СВЧ
И
БЕЗОПАСНОСТЬ
ЧЕЛОВЕКА

Б. А. МИНИН

СВЧ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЧЕЛОВЕКА

Под общей редакцией
М. М. Левина

Москва «Советское радио» 1974

6Ф2.19
М 618
УДК 614.898:538.569

Минин Б. А. **СВЧ и безопасность человека.** М., «Сов. радио», 1974, 352 с.

Изложены основные принципы обеспечения безопасности людей, работающих под воздействием мощных электромагнитных излучений в диапазоне СВЧ. Приведены сведения, позволяющие рассчитывать и измерять поля антенн и внутренних излучений, возможных при работе средств связи, радиовещания, радиолокации, радионавигации.

Приведены некоторые характерные результаты исследований в области биологического действия радиоволн СВЧ. Кратко рассмотрены вопросы теории и практики нормирования радиоизлучений. Даны основные сведения по организации защиты от СВЧ и рентгеновских излучений.

Книга рассчитана на инженеров, техников, гигиенистов, а также научных работников общего профиля, занимающихся обеспечением безопасности и проектированием средств защиты.

144 рис., 37 табл., библ. 204 назв.

Ц4
22278

Редакция литературы по электронной технике

Гос. публичная
научно-техническая
библиотека СССР
ЧИТ... ОТ... ЗАЛА
74-10412

М $\frac{30404\text{-}012}{046(01)\text{-}74}$ 32-73

© Издательство «Советское радио», 1974 г.

Моим друзьям
и лучшим наставникам
посвящаю

В последние годы отмечено рождение научной и технической отрасли, занимающейся изучением и ограничением биологического действия радиоволн — сравнительно нового экологического фактора.

Вопрос об ограничении вредного воздействия экологических факторов явился за последние годы предметом дискуссий многих видных ученых на многих весьма представительных международных семинарах, симпозиумах, конференциях. С 1965 г. этим вопросом занимается известная «Комиссия 2000 года» (H. Kahn, A. Wiener, 1967). 2000-й — это не так близко, но уже сейчас считают, что первоочередной задачей наших ближайших потомков будет борьба не с голодом, а именно «с растущим загрязнением окружающей среды и нарушением экологического равновесия в природе» (Г. Герасимов, 1970).

Несмотря на то, что отдельные рекомендации по защите и некоторые приспособления для обнаружения радиоволнового излучения были известны еще в 40—50-х годах, оформление отдельной проблемы науки и техники как направления начинается только с обоснования и обобщения всех ее отдельных звеньев, поэтому можно считать, что проблема биологического действия радиоволн и защиты от них появилась буквально у нас на глазах.

Несмотря на обилие публикаций, полностью или частично посвященных рассматриваемой здесь проблеме, в том числе ее биологическим, техническим, социальным и даже философским и психологическим аспектам, эти публикации, как правило, разрабатывают частные вопросы, отдельные «деревья» большого «леса». Исключением являются, пожалуй, только краткие работы У. У. Мамфорда (1961 г.), Константа и Мартина (1963), замечательно составленный обзор Б. В. Сертованцева (1961) и особенно книга А. С. Пресмана (1968); первые три — преимущественно инженерного плана, последняя — биофизического. Несмотря на выраженную специфику этих работ, каждая из них уделяет определенное внимание всему комплексу интересующих сегодня практику задач.

Первая публикация, посвященная специально нашему вопросу, появилась в 1943 г. (Daily L. E., 1943). К настоящему времени их насчитывается уже более тысячи, и они в целом охватывают огромный перечень решенных и решаемых задач. Но, к сожалению, эти работы рассеяны «в пространстве и во времени»: за последние 10—15 лет они появились в самых различных журналах и изданиях инженерного, биологического, медицинского и гигиенического профилей, в изданиях АН и АМН СССР, ВЦСПС; издательств «Советское радио», «Мир», «Энергия», в Трудах Института радиоинженеров, Института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, в других специальных, военных и даже популярных журналах США, ФРГ, Англии, Чехословакии и других стран. С 1969 г. в США начал издаваться журнал («Non-ionizing radiation»), специально посвященный неионизирующим излучениям (радиочастотным, инфракрасным и лазерным).

В СССР по общей теме «Биологическое действие радиоволн» проведено несколько симпозиумов, последний из которых, состоявшийся в мае 1973 г. в Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова (г. Ленинград), был блестяще организован и, видимо, окажется наиболее результативным.

Цель настоящей книги — обобщить литературные данные и попытаться из имеющихся кирпичиков выстроить одно, пусть на первый раз небольшое, но единое здание, имеющее свой «вход» и «выход», свою структуру и методологическую основу. Несмотря на кажущуюся стерео-

типность рассматриваемых здесь и в специальной литературе вопросов (например, посвященных анализу поля антенн, разработке конструкций измерительной аппаратуры и т. д.), специфика целей и применений определила специфику исследований и, конечно же, стиль изложения результатов этих исследований здесь, в книге, рассчитанной на весьма разнородный по своей подготовке контингент читателей. Больше того, рассмотрение «тонкостей» отдельных вопросов в тех случаях, когда разбирались вопросы или новые, или малоизвестные для широкого круга читателей, потребовало определенного углубления в специальные области и не позволило выдержать до конца терминологию, понятную для обеих групп наиболее вероятных читателей книги: инженеров и медиков. Отдельные важные, с точки зрения автора, положения выделены курсивом. Номера основных расчетных формул набраны жирным шрифтом.

В написании отдельных глав и параграфов книги приняли участие следующие товарищи: В. С. Блюменталь подготовил и написал п. 7.3.1 и 7.4.3; И. В. Кичаева — п. 5.1.11, В. И. Копейкин — § 4.2, С. П. Новикова и Л. Б. Петрова-Голубенко — § 2.2, Н. И. Фалин — п. 7.4.2. В обсуждении отдельных положений, изложенных в книге, приняли участие чл.-корр. АН СССР проф. Л. Д. Бахрах, д-р техн. наук Б. Е. Кинбер, д-р мед. наук А. Г. Суббота, а также проф., д-р техн. наук Р. А. Валитов, которому принадлежит и идея издания этой монографии.

Несомненное влияние на качество и направленность материала, изложенного в книге, оказали плодотворные дискуссии с Е. А. Ермолаевым, В. И. Коганом, И. И. Маркиным, А. Н. Соколовым, В. В. Оробеем, М. П. Троянским, Н. Н. Фелицыным, П. Н. Чумаком, С. П. Яненко, с коллегами автора по работе. Автор считает своим приятным долгом выразить глубокую признательность всем принявшим участие в написании и обсуждении отдельных разделов работы и способствовавшим своими замечаниями улучшению всей книги в целом, особенно проф., д-ру техн. наук Р. А. Валитову и редактору книги канд. техн. наук М. М. Левину, который подробным и внимательным обсуждением многих положений, советами и прямым участием помог в написании всех ее основных разделов.

Б. Минин

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$B_{дф}$ — дифракционное затухание экрана
$B_{скз}$ — сквозное затухание экрана
B_β, B_φ — коэффициенты «дефокусировки», зависящие от расстояния и определяемые параметрами функции амплитудного распределения вдоль соответствующей стороны апертуры
$D(R)$ — коэффициент направленного действия на расстоянии R
d — расстояние между излучателями в решетке
$E_{зем}$ — напряженность электрического поля Земли
$E_{пик}$ — пиковое значение напряженности электрической составляющей поля
$F_{зем}$ — модуль коэффициента отражения от земли
f_a, $f_a(S)$ — функция амплитудного распределения поля по апертуре излучателя
$f(S) = f_a(S)_0^{-j\Psi(S)}$ — функция амплитудно-фазового распределения поля по апертуре
G — коэффициент усиления антенны
$H_{тк}$, $E_{тк}$ — напряженность составляющих волны в тканях
h — высота расчетной точки над уровнем земли
J — коэффициент реактивности
k_a, k_b — коэффициенты, определяемые функциями амплитудного распределения вдоль соответствующих сторон апертуры (a и b);
$k_{исп}$ — коэффициент использования площади апертуры
k_0 — коэффициент отражения от границ между тканями на различных частотах
$L_{экр}$ — размер экрана
$M(n)$ — масштабная функция (М-функция), дБ
$\overline{M}(n)$ — то же, в натуральных отношениях
N — общее количество прерывистых воздействий за время облучения
$\tilde{n}$, $\tilde{a}$ — параметры функции амплитудного распределения поля по апертуре
n_0 — приведенный угол при центральном положении луча сканирующих антенн
$P_{изл}$ — излучаемая мощность
q — скважность импульсного сигнала

$q_м$ — скважность манипуляции сигнала на входе измерительного устройства

$R_{а.ц}$ — расстояние от центра апертуры антенны до мнимого амплитудного центра (МАЦ)

$R_д$ — граница дальней зоны антенны; $R_{дθ}$, $R_{дφ}$ — соответственно в плоскостях θ или φ

S — геометрическая площадь антенны

s — наклон огибающих диаграмм антенн в логарифмическом масштабе

$S_д$ — поглощающее (эффективное) сечение сферы

T — период облучения; общее время нахождения объекта в точке облучения

$T_н$ — нормируемое время усреднения ППМ

$T_о$ — время облучения

t — текущее время

$U_{т\,н}$ — скалярная функция, соответствующая составляющей поля. Индекс «т н» указывает на значение функции в точке наблюдения

$W_э$, $W_м$ — объемная плотность энергии в пространстве

$x = R/R_д$ — приведенное расстояние

$x_θ = R/R_{дθ}$, $x_φ = R/R_{дφ}$ — приведенное расстояние для плоскостей θ и φ

$x_{а.ц} = R_{а.ц}/R_д$ — приведенное расстояние между центром антенны и мнимым амплитудным центром

α — сектор сканирования

$a(x)$ — корректирующая функция в расчетах $\Pi_0(R)$

β — показатель затухания экспоненты

γ — скважность прерывистого воздействия

$\gamma_{встр}$ — угол встречи (угол скольжения)

γ_0 — скважность осевого поля

Δ — превышение центра антенны над расчетной точкой

$\Delta_д$ — величина Δ, при которой можно считать объект защищенным

δ_1 — уровень первого бокового лепестка, дБ; $\delta_{в.г}$ — конкретно в плоскостях θ или φ

ε — диэлектрическая постоянная; угол места антенны

$\varepsilon_д$ — угол места, при котором можно считать объект защищенным

η — к. п. д. антенно-фидерного тракта

θ, φ — угол между электрической осью антенны и направлением на МАЦ — расчетная точка в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$\bar{\theta}$, $\bar{\varphi}$ — угол между электрической осью антенны и направлением центр апертуры — расчетная точка в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$\theta_{0,5}$ — половина ширины диаграммы антенны по уровню —3 дБ в вертикальной плоскости (для круглых антенн в любой плоскости)

$\theta_{эфф} = 2\theta_{0,5}/B_0$

$\lambda_{тк}$ — длина волны в тканях (органических)

$\lambda_{макс}$ — максимум спектральной интенсивности рентгеновского излучения

ν — погрешность расчета; отношение расчетных данных к экспериментальным

$\tau_{пад}$ — $2\tau_{в.э}/B_{ф}$

$\Psi(S)$ — функция фазового распределения поля по апертуре излучателя

$\psi = e^{-jkr}/r$ — функция сферической волны на расстоянии r от точки интегрирования до точки наблюдения

$П_{д}$ — величина ППМ, при которой можно считать объект защищенным

$П_{зем}$ — ППМ с учетом земли

$П_{н}$ — нормативное значение ППМ

$П_{о}$ — ППМ на электрической оси антенны или ППМ перед экраном

$П_{погл}$ — плотность мощности, поглощаемой телом

$П_{кр}$ — пробойная величина ППМ

$П_{р}$ — выбранные расчетные значения лепестков плотностей вертикальной диаграммы излучения (ВДИ)

ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Появление и развитие радиосредств передачи информации, а в последнее время и энергии [12, 145], на значительные расстояния сопровождается увеличением излучаемых в пространство мощностей. По данным зарубежной статистики [85], в послевоенные годы излучаемые мощности радиолокационных станций (РЛС) увеличиваются на 10 ... 15 дБ (в 10 ... 30 раз) за десятилетие, т. е. прирост энергии СВЧ во много раз превышает общий прирост энергии на земном шаре (теперь он составляет около $3 \cdot 10^{2}$ Дж/с, или 10^{10} Дж/год, что соответствует удвоению производства энергии каждые 20 лет [24]).

В настоящее время освоены и применяются установки, генерирующие и излучающие среднюю мощность СВЧ порядка долей мегаватт [31] и, как явствует из данных научных исследований, это далеко не предел. Повышение излучаемых мощностей идет параллельно с развитием антенных систем, сочетающих возможность перемещения диаграммы направленности с достаточно высоким коэффициентом направленного действия. Увеличение мощностей и формирование узконаправленных диаграмм, как правило, сопровождается повышением абсолютного и относительного уровней побочных излучений в зоне действия антенных полей и около генераторной аппаратуры. Это привело к возникновению проблемы защиты человека от радиоизлучений.

Радиоволновая гигиена, или *радиогигиена*, — наука, решающая задачи по учету и предотвращению вредного действия энергии электромагнитных полей (ЭМП) во всем диапазоне радиоволн: от десятков тысяч герц до тысяч гигагерц. Специфические свойства электромагнитных излучений СВЧ, особенно на участках сантиметровых и дециметровых волн*, ставят этот диапазон в отно-

* За рубежом, а иногда и в отечественной литературе, особенно в медицинской, их часто называют общим термином — микроволны.

шении его биологической эффективности в особое положение. Поэтому основное внимание в этой работе уделено методам и измерительной аппаратуре, пригодным для использования именно в этом участке диапазона.

Техника радиогигиены СВЧ включает в себя три основных аспекта (табл. 1): *нормирование*, т. е. определение на основе клинико-физиологических и биофизических данных необходимого перечня биологически эффективных параметров воздействующего фактора (электромагнитного поля), предельно допустимых значений каждого из этих параметров и форму их представления; *обнаружение* биологически значимых параметров и *защиту* — систему мероприятий инженерного, организационного и медико-биологического плана, направленную на предотвращение или снижение до минимума вредных последствий воздействия.

Современные масштабы организации защиты от избыточного действия СВЧ излучений таковы, что зачастую ее стоимость оказывается соизмеримой со стоимостью радиоизлучающей аппаратуры, поэтому весьма важно найти оптимальные формы нормирования, обнаружения и защиты, предусматривающие максимум экономичности при необходимой степени безопасности.

Наиболее распространенной формой нормирования СВЧ излучений является нормирование по уровню плотности потока мощности (ППМ) *. Значения допустимой ППМ, принятые в различных странах, приведены в табл. 2 (составлена по данным, представленным А. Г. Субботой, кроме сведений по США); эволюция норм в нескольких организациях и фирмах США [85, 124] показана на рис. 1. Сейчас, с усложнением форм воздействия радиоизлучений, пользоваться нормативами в принятом виде затруднительно. Эти трудности увеличиваются при оценке почти одновременного воздействия излучений нескольких излу-

---

* В Международной системе единиц измерения (СИ) ППМ соответствует поверхностной плотности потока излучения (интенсивности излучения) — величине, равной отношению средней мощности излучения за время Δt, значительно большее периода колебаний, к площади. В соответствии с Государственными стандартами, плотность потока, *испускаемого* с данной поверхности, обозначается $R_э$, *падающего* на данную поверхность — $E_э$. В настоящей книге вместо $R_э$ и $E_э$ применяется обозначение $П$ — плотность потока мощности, падающего на облучаемую поверхность. В дальнейшем для краткости «плотность потока мощности» будем называть «плотностью мощности».

Таблица 1

Основные направления развития техники защиты СВЧ

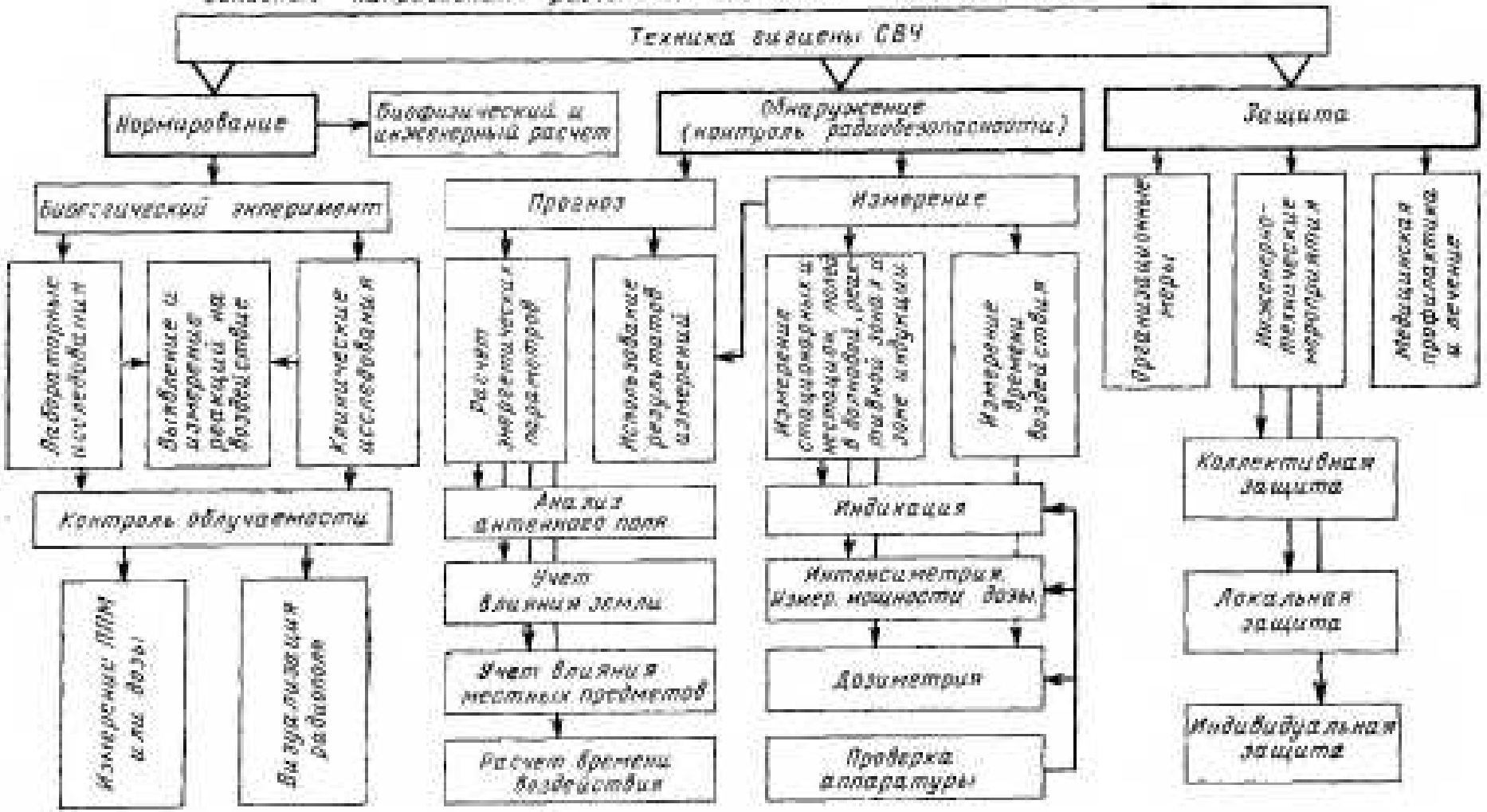


Таблица 2

Предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия на людей электромагнитных излучений СВЧ диапазонов [например, 75]

Страна	Диапазон частот и режим облучения	ПДУ в принятой форме	Допустимое время облучения
СССР			
	СВЧ	10 мкВт/см²	7—8 ч
		100 мкВт/см²	2 ч
		1 000 мкВт/см²	15—20 мин
	УВЧ диапазон	5 В/м	Без ограничения
Для персонала	ВЧ диапазон	20 В/м, 5 А/м	То же
	НЧ диапазон (50 Гц)	5 000 В/м	Без ограничения
		10 000 В/м	3 ч
		15 000 В/м	1,5 ч
		20 000 В/м	10 мин
		25 000 В/м	5 мин
Для населения	СВЧ	1 мкВт/см²	Без ограничения
ЧССР			
	СВЧ (непрерывный)	25 мкВт/см² (Суточная доза $D^{сут} = \Pi t \leqslant 200$ мкВт/см²)	8 ч
Для персонала	СВЧ (импульсный)	10 мкВт/см² ($Д^{сут} = \Pi t \leqslant 80$ мкВт/см²)	3 ч
Для населения	СВЧ (непрерывный)	2,5 мкВт/см² ($Д^{сут} = \Pi t \leqslant 60$ мкВт/см²)	Без ограничения
	СВЧ (импульсный)	1 мкВт/см² ($Д^{сут} = \Pi t \leqslant 24$ мкВт·ч/см²)	Без ограничения

Продолжение табл. 2

Страна	Диапазон частот и режим облучения	ПДУ в прямой форме	Допустимое время облучения
Польша	СВЧ	Те же, что и в СССР, но 10 мкВт/см² без ограничения времени	
США Обслуживающий персонал (Стандарт США USASC95.1—1966)	10 МГц—100 Гц	ППМ, средняя за 6 мин, не должна превышать: 10 мВт/см²—для обычных условий, 1 мВт/см²—для тяжелых температурно-влажностных условий (ТВУ)	Без ограничения времени. Для кратковременных излучений нормируется шестиминутная доза $Д^{(6\,мин)} = 0{,}1 \ldots 1$ мВт·ч/см² (в зависимости от ТВУ)
Население	СВЧ	1 мВт/см²	Без ограничения
Великобритания	30—30 000 МГц	10 мВт/см²	Без ограничения
ФРГ	СВЧ	Те же, что и в США	
Франция	СВЧ	Те же, что и в США	
Голландия (фирма Филипс Эйндгобен)	30—30 000 МГц	1 мВт/см² 10 мВт/см²	Без ограничения ≤6 мин

Примечание. В настоящее время наблюдается тенденция к переходу на обозначение ППМ в Вт/м². Например ППМ 10, 100, 1 000 мкВт/см² соответствуют 0,1; 1 и 10 Вт/м².

чателей с различными ППМ. Например, современный авианосец с атомным двигателем типа «Интерпрайз», (ВМФ США) оснащен более чем 500 антеннами. Значительная часть их — передающие, многие из которых — сканирующие или вращающиеся. Для оценки подобных случаев вопрос об оптимизации форм нормирования стоит особенно остро.

Пока за основу при выработке нормативов в области СВЧ принята концепция, согласно которой гигиеническое значение имеют только притепловые интенсивности*

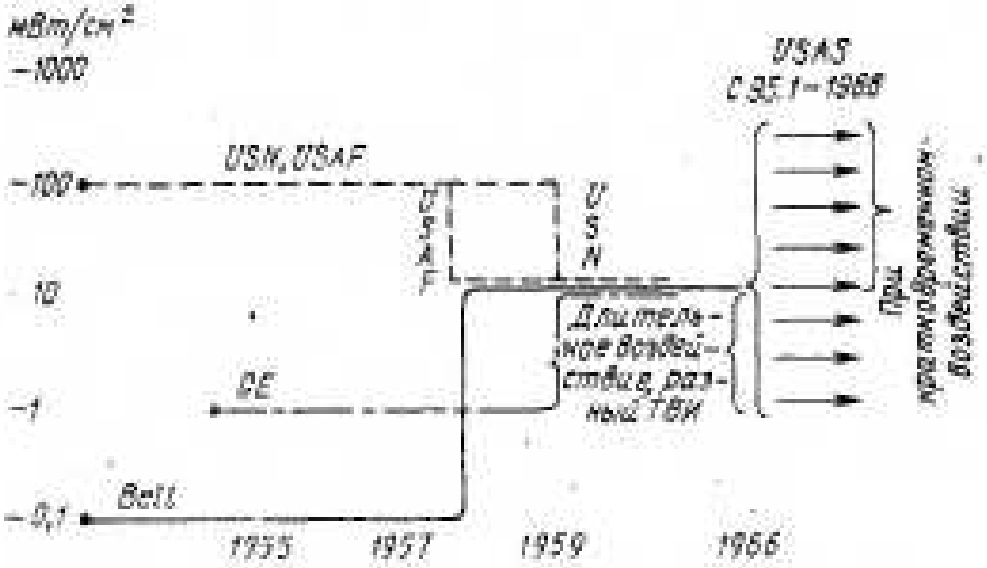


Рис. 1. Уровни максимально допустимой плотности мощности электромагнитных излучений в организациях и фирмах США в период 1953—1966 гг.:

USN — ВМС США; USAF — ВВС США; GE — фирма General Electric; Bell — фирма Bell; USAS C95.1—1966 — стандарт США; ТВИ — температурно-влажностный индекс.

и ниже, т. е. ППМ≤10 мВт/см². Ощущение тепла при воздействиях радиополей на этих уровнях ничтожно, вследствие чего человек обычно не подозревает об опасности. Поэтому приходится разрабатывать целую систему контроля облучаемости — достаточно надежные методы *обнаружения* радиоизлучений (инструментальные методы индикации наличия радиополей и количественного измерения необходимых параметров, например ППМ), а также *расчет* на основе определенных характеристик излучателя.

* В данной книге понятие «интенсивность», если нет особой оговорки, соответствует понятию «величина ППМ» или «величина напряженности» одной из составляющих поля.

Особое значение *расчетных* методов заключается в том, что они дают возможность предвидеть биологическую опасность до ввода излучателя радиотехнической станции (РТС) в строй, т. е. в возможности осуществить радиопрогноз. Основным направлением в совершенствовании расчетных методов является минимизация исходных данных, необходимых для радиопрогноза, снижение расчетного времени и упрощение использования готовых результатов расчета при сохранении необходимой точности в заданном диапазоне применимости.

После ввода РТС в эксплуатацию, если позволяет ее режим работы, расчетные данные проверяются путем *измерений* в реальных условиях. В некоторых случаях измерения вообще являются единственным способом оценить радиообстановку: например, на сложных трассах при сложных диаграммах антенн. Во многих случаях измерения, проводимые с помощью универсального комплекса аппаратуры типа ПО-1, позволяют получить достаточно полную картину облучаемости отдельных мест внутри технологических помещений и даже территории объектов вблизи излучающих антенн. Сложная пространственная структура внутренних* полей, необходимость проведения массовых измерений на больших площадях (десятки и сотни квадратных километров) заставляют усложнять измерительную аппаратуру, применять электрически малые зонды, цифровую индикацию, а в ряде случаев — накопление результатов.

Превышение уровня или дозы предельно допустимых значений является основанием для проведения *защитных мероприятий*, которые оказываются наиболее трудоемкой и практически важной частью общей программы биологической защиты. Кроме организации и пропаганды определенных мер предосторожности, во многих случаях приходится применять сложные технические сооружения, снижающие уровень до необходимого минимума в границах защищаемого объекта. Применение подобных сооружений связано с затратой более или менее значительных сил и средств, и поэтому их следует тщательно рассчитывать.

Правильное нормирование, своевременное обнаружение и реализация защитных мероприятий позволяет устранить вредное воздействие радиоизлучений, обеспечить нормальную жизнедеятельность людей.

---

* Определение внутренних полей см. ниже, в п. 1.2.2.

1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БИОСФЕРА ЗЕМЛИ. ПРИРОДА И ЭКОЛОГИЯ

Радиоволновая гигиена как наука и как комплекс практических мероприятий основывается на данных биофизики, которая определяет физику взаимодействия излучений с живой материей на всех уровнях — от целостного организма до молекулы, служит качественному пониманию этого взаимодействия и, главное, установлению количественных отношений между величиной и формой воздействия, с одной стороны, и реакцией организма, с другой.

В. И. Вернадский , А. Сент-Дьердьи, И. С. Шкловский, А. Л. Чижевский — эти имена и имена многих других исследователей для нас тесно связаны с проблемой взаимосвязи «жизнь и биосфера». Биосфера как неразрывное целое сочетает в себе огромный набор факторов, взаимосвязь с которыми позволяет организму Жить. Многие из них явны, о них человечество узнало с самого начала осознания своего Я, другие были открыты в самое последнее время, о многих мы, очевидно, еще не догадываемся.

Нашу планету миллиарды лет пронизывают потоки ионизирующих частиц, электромагнитных излучений — космических, земного или околоземного происхождения. Длины волн электромагнитного спектра этих излучений простираются от долей миллиметра до тысяч километров, каждый из участков этого огромного спектра сыграл свою роль в развитии живого на Земле; многие участки используются, как полагают, самими организмами в процессе их жизнедеятельности (в частности, для синхронизации ряда важнейших физиологических процессов и организации биологической связи внутри сообществ).

Электромагнитное поле как особая форма организации материи обладает как общими, присущими всему материальному, так и некоторыми особыми свойствами. Широкий диапазон частот, огромные пределы изменения амплитуды во времени и по спектру, а в последнее время и высокая когерентность излучений в совокупности определяют характер взаимодействия поля с живыми организмами. Прежде чем перейти к описанию этих форм, есть смысл хотя бы кратко напомнить о свойствах

электромагнитной части биосферы (далее — просто электромагнитной биосферы) нашей планеты, об основных физических явлений, характеризующих электромагнитное поле.

1.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ КАК БИОФИЗИЧЕСКИЙ ФАКТОР. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ БИОСФЕРА ЗЕМЛИ

Характерной формой взаимодействия электромагнитного поля с живым организмом (подробные исследования на эту тему приведены в книге А. С. Пресмана [118], материалы которой использованы при написании этого параграфа) является сочетание *нагрева ткани*, зависящего от поглощенной тканями (как полупроводящей средой) энергии, и *информационного акта*, определяющего нетепловое воздействие на организм. Вторая сторона воздействия — нетепловое, или, как иногда говорят, специфическое действие радиоволн — определяется именно этим информационным аспектом воспринимаемых организмом электромагнитных излучений. Спектр и форма этого воздействия зависят от свойств источника и канала связи. Как показывают наблюдения, чувствительность организма в этом случае оказывается намного выше рассчитанной исходя из простейших соображений о тепловом действии радиоволн. Очевидно, что информационные процессы играют определенную роль и при тепловом (более 10 мВт/см^2) воздействии когерентных микроволн на организм. Больше того, такой специфический фактор, как концентрация электромагнитной энергии в объемах тела, ограниченных радиоконтрастными средами, приводит к локальному нагреванию, к «микронагревам». Поэтому деление двух сторон взаимодействия «поле — организм» на информационные и тепловые весьма условно.

Исследования показывают, что особой чувствительностью к ЭМП обладают органические тела только на макроскопическом уровне, по крайней мере начиная с упорядоченных макромолекулярных ансамблей, и в наибольшей степени эта чувствительность проявляется только в целостном организме. Поэтому причинно-следственные зависимости взаимодействия внешнего электромагнитного воздействия и организма часто заставляют прибегать к феноменологическому описанию, опираясь фактически на две группы довольно далеко отстоящих друг от друга исследований: на молекулярном уровне (на изолированных тканях, клетках и культурах клеток),

с одной стороны, и на уровне изучения поведенческих реакций целостного организма и его отдельных сложных систем (сдвиги в нервно-гуморальной сфере, изменения в процессе размножения и развития организмов, морфологические изменения в органах) — с другой.

Электромагнитная биосфера нашей планеты определяется, в основном, электрическим и магнитным квазистатическими полями Земли, атмосферным электричеством (грозовыми разрядами, в частности, молниями), радиоизлучением Солнца и галактик, а в последнее время полем искусственных источников: полем «выделенных» излучателей (антенные поля и паразитные радиоизлучения аппаратуры) и общим «радиофоном» от многочисленных удаленных радиопередающих центров.

Электрическое поле Земли направлено нормально к земной поверхности (заряженной отрицательно относительно верхних слоев атмосферы). Напряженность электрического поля у поверхности земли $E_{зем} \approx 130$ В/м и убывает с высотой примерно по экспоненциальному закону (на высоте 9 км $E_{зем} \approx 5$ В/м). Годовые изменения $E_{зем}$ сходны по характеру на всем земном шаре: величины $E_{зем}$ достигают максимума в январе — феврале (до 150 ... 250 В/м) и минимума в июне—июле (100 ... ...120 В/м). Суточные вариации электрического поля атмосферы связаны с суммарной грозовой деятельностью по земному шару, но зависят также от местной грозовой деятельности.

Напряженность *магнитного поля Земли* характеризуется двумя параметрами. Горизонтальная составляющая максимальна у экватора (20...30 А/м) и убывает к полюсам (до единиц А/м). Вертикальная составляющая у полюсов составляет около 50...60 А/м, уменьшаясь у экватора до пренебрежимо малой величины. На земном шаре оказываются отдельные области, где величина вертикальной составляющей намного выше («положительные аномалии») или ниже («отрицательные аномалии») среднего значения.

Частотный спектр *атмосфериков* простирается в диапазоне от сотен герц до десятков мегагерц. Максимум интенсивности их находится вблизи 10 кГц и убывает с частотой. Среднегодовая интенсивность оценивается по площади, занятой грозами, максимальна на континентах тропического пояса. Площадь, занятая там грозами, в 15 ... 20 ч местного времени достигает 500 ... 600 тысяч

квадратных километров, уменьшаясь к высоким широтам. Интенсивность грозовой деятельности всегда и везде минимальна в утренние часы и повышается к ночи. В холодное время максимум отмечается среди ночи, в теплое — в 15 ... 18 ч. В средних широтах наибольшее число гроз приходится на июнь — июль, наименьшее — на зимние месяцы. Во время вспышек на Солнце атмосферики значительно усиливаются.

Спектр *радиоизлучения Солнца и галактик* занимает область приблизительно от 10 МГц до 10 ГГц. В «спокойном» состоянии интенсивность солнечного излучения находится в пределах от 10^{-10} до 10^{-8} Вт/м²·МГц. Во время вспышек излучение усиливается в несколько десятков раз. Спектр и интенсивность радиоизлучения галактик близки к спектру и интенсивности спокойного Солнца.

Интенсивность *радиоизлучения искусственных источников* находится в непосредственной зависимости от мощности генераторов, доли энергии, передаваемой на излучение, а также от коэффициента направленного действия излучателей и расстояния до излучателей. Интенсивность антенных полей может изменяться (в зависимости от перечисленных условий) от долей микроватта до нескольких ватт на квадратный сантиметр, от сотен микровольт до сотен вольт на метр. «Паразитные» (или «внутренние» — определение см. п. 1.2.2.) излучения аппаратуры определяются, кроме мощности устройства, тщательностью выполнения экранировки.

Характерной особенностью этого вида радиоизлучения, в отличие от природных, является высокая когерентность — частотная и фазовая стабильность, означающая также высокую концентрацию энергии в очень узких областях спектра (например десятки герц для телеграфной, единицы килогерц для радиотелефонной, единицы мегагерц для радиолокационной аппаратуры и т. д.).

Радиофон — это суммарный эффект всех излучающих радиосредств земного шара и, прежде всего, длинноволнового, средневолнового и коротковолнового диапазонов. Интенсивность радиофона находится в пределах от десятков микровольт до десятков милливольт на метр и имеет явно выраженные суточные колебания, которые при современной насыщенности радиодиапазона зависят фактически полностью от условий распространения радиоволн. Например, максимум деятельности дна-

пазона 10...20 м приходится на дневные и вечерние часы, 30...70 — на вечерние и ночные, 200...500 м — на вечерние, ночные и утренние.

На рис. 1.1.1 показано распределение интенсивности основных естественных и искусственных источников радиоизлучения в диапазоне 0,010...10^5 МГц и условия прохождения различных участков волн сквозь атмосферу, облака и ионосферу.

Созданные в ходе эволюции электромагнитные системы живой природы надежно защищены от воздействия спонтанных изменений ЭМП внешней среды; многие же из обнаруженных нами связей с внешней средой необхо-

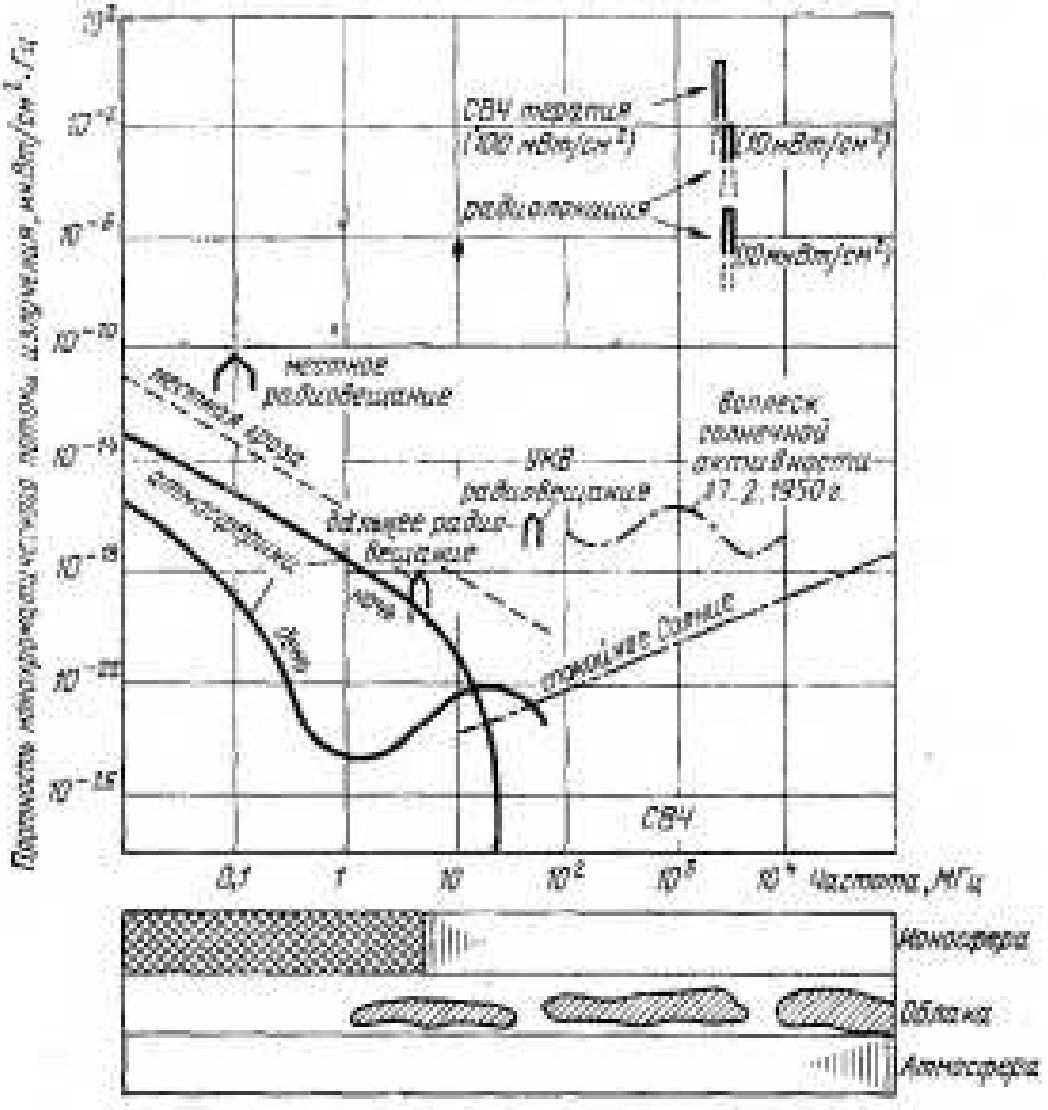


Рис. 1.1.1. Распределение плотности мощности по спектру основных естественных источников радиоизлучения и некоторые примеры источников искусственного происхождения, а также пропускания земной атмосферы для излучения различных длин волн [41, 145].

димы, по-видимому, для организации собственных процессов жизнедеятельности. Например, известна исключительно высокая степень влияния солнечной активности буквально на все виды биологической и физиологической деятельности организмов, и, в частности, на состав крови, лимфы и клеточной протоплазмы, на рост эпидемий различных инфекционных заболеваний, на скорость размножения рыб, насекомых и ряда млекопитающих и даже на численность популяций животных.

Как правило, регулирующее действие оказывают циклические изменения радиополя; спорадические изменения приводят к нарушению процессов жизнедеятельности, особенно заметных в период развития организма и в патологическом состоянии. При исследованиях влияния СВЧ поля на живой организм следует иметь в виду, что само по себе экранирование также может быть вредным. Поэтому наиболее правильным следует считать изучение влияния излучений в неэкранированных кабинах либо в кабинах с достаточно хорошей имитацией естественных условий. Для бытовых целей в США в настоящее время делается попытка создать имитатор естественных условий, применять который считается особенно целесообразным в бетонных и железобетонных домах.

1.2. РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ СВЧ АППАРАТУРЫ

Можно назвать в основном три группы людей, подвергаемых воздействию радиоволн СВЧ: специалисты, производящие радиоаппаратуру, персонал, эксплуатирующий ее, а также определенный контингент людей, по роду своей деятельности не связанных с источниками излучений, т. е. подвергаемых облучению случайно.

Первая группа людей относительно невелика, но подвергается облучению более или менее постоянно. При правильно организованной технике безопасности в подавляющем большинстве случаев интенсивность поля может быть доведена до необходимого минимума, но опыт показывает, что на определенных этапах производства, особенно при наладке, регулировке, когда предотвратить избыточное воздействие удается далеко не всегда, и при существующей технике защиты тенденции к уменьше-

нию облучаемости в этой категории работ еще не наблюдается.

Возрастает количество людей второй группы, занятых эксплуатацией мощной СВЧ радиоаппаратуры. Сейчас нельзя назвать их общее число, однако, естественно, оно во много раз превышает число людей первой группы. Серьезность положения заключается в том, что в большинстве случаев, особенно если излучателем является антенна, предотвратить облучение территории с людьми или трудно технически, или принципиально невозможно.

Третья категория людей подвергается облучению, не имея никакого отношения ни к аппаратуре, ни к выполняемой ею задаче. Сюда можно отнести жителей населенных пунктов, находящихся в зоне действия излучателей, летчиков и космонавтов, пролетающих в зоне действия огромного количества наземных станций, и т. д. Несмотря на очевидную многочисленность людей этой группы, как показывает опыт, сейчас говорить об особой опасности для нее не приходится.

1.2.1. Заполнение спектра радиоволн диапазона СВЧ. Рассмотрим подробнее, как заполнен к настоящему времени спектр диапазона СВЧ [58]. Участок 30...1000 МГц занимает телевизионное вещание (всего 85 каналов). Наземные и воздушные подвижные виды связи занимают участки 225...500 МГц. Для радиолокационных станций отведены участки в диапазоне 137... ...9500 МГц: 137...144; 216...225; 400...450; 890... ...942; 2900...3100; 5400...5650; 9300...9500 МГц. Аппаратура промышленного научного и медицинского назначения работает на частотах: 434; 890 ... 940; 2450±50

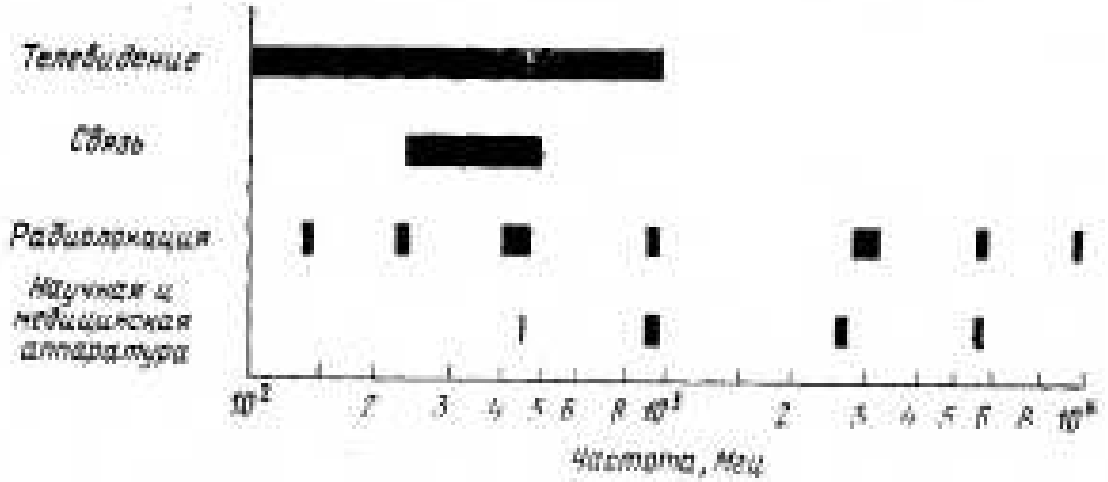


Рис. 1.2.1. Использование спектра в диапазоне СВЧ.

и 5800±75 МГц (рис. 1.2.1). Каждая из этих служб обладает бесконечным разнообразием возможных ситуаций, при которых человек оказывается подвергнутым облучению энергией СВЧ.

В табл. 1.2.1 в качестве примера приведены характеристики некоторых зарубежных станций, которые помогут представить общую картину облучаемости (следует иметь в виду, что на позиции интенсивности облучения на 20...40 дБ меньше, чем в центре апертуры).

Таблица 1.2.1

Характеристика излучений в зоне действия некоторых зарубежных РЛС [79]

Тип РЛС	Средняя мощность передатчика, Вт	Площадь антенны, м²	ППМ в апертуре, мВт/см²	Коэффициент направленного действия антенны, дБ	Расстояние (км) по основному лепестку для уровня 10 мкВт/см² при в. п. д. = =0,6
AN/FPS-49	$0{,}27 \cdot 10^6$	400	55	38	25
AN/FPS-50	$0{,}6 \cdot 10^6$	6 000	8,3	49	120
SPASUR	10^6	50 000	2	52	250
РЛС в Хайстеке	$0{,}1 \cdot 10^6$	1 100	9,1	60...69	540
РЛС системы MSFN*	$20 \cdot 10^3$	540	3,9	51	25

* Станции слежения за космическими кораблями „Аполлон", расположенные в Голдстоуне (США), Робледо де Чавела (Испания), Иоганнесбурге (ЮАР), Тидбинбилла (Австралия).

Наибольшей насыщенностью радиосредствами отличаются суда морского флота, где на сравнительно небольшой территории приходится размещать большое количество больших и малых радиолокационных станций, таких, например, как «Нептун», «Дон», «Донец», «Створ», «Декка» [53]. Эти РЛС облучают открытые палубы и надстройки полем высокой интенсивности, представляющей определенную опасность для плавсостава. Наличие относительно широкой «мертвой» зоны антенн исключает опасное облучение на нижней палубе, под антенной, но на корме плотность мощности возрастает (от десятков и сотен до тысяч микроватт на квадратный сантиметр).

Опасность избыточного воздействия радиоволн СВЧ для летного состава вследствие малой мощности борто-

вых устройств и удаленности наземных радиолокаторов от аэродромов относительно невелика.

Рассмотрим подробнее пространственную энергетическую структуру полей, воздействующих на человека во время эксплуатации и настройки готовой аппаратуры. Условия облучения полем СВЧ достаточно подробно рассмотрены в работе [75].

1.2.2. Реальные условия облучения СВЧ полем. Даже без учета временных характеристик эти условия чрезвычайно разнообразны.

В помещениях с генераторной аппаратурой и элементами фидерного тракта (рис. 1.2.2) как результат отсутствия должной радиогерметичности имеют место так называемые внутренние* излучения аппаратуры *(1, 2)*, создающие угрозу облучения непосредственно на рабочем месте**. Иногда внутренние поля возникают вследствие проникновения через стены или крышу лучей — прямого *(3)* или переотраженного металлическими включениями *(4)*, имеющимися в материале стен и крыши. Картина поля осложняется отражениями от поверхностей стен и шкафов с аппаратурой *(5)*. На некоторых производственных участках и контрольно-испытательных станциях (КИС) внутри помещений находятся излучающие антенны, которые, если не закрыты необходимыми поглощающими насадками, и оказываются основным источником опасности.

---

* Внутренние поля — поля внутри помещений, ограниченных обычно хорошо отражающими поверхностями. Паразитные излучения — излучения, проникающие через электромагнитные неплотности устройств экранировки генераторов, фидеров, антенных коммутаторов и т. п. В большинстве случаев внутренние поля образуются только в результате паразитных излучений аппаратуры.

** Опасность переоблучения внутренними полями была отмечена еще с появлением диатермических установок, используемых для ВЧ нагрева. Первые диатермические установки появились в 1935 г., а сейчас число этих установок только в США намного превысило 2 000 [188]. До недавнего времени все они эксплуатировались исключительно в промышленных условиях, но сейчас СВЧ генераторы появляются и в быту. Особую популярность приобретают магнетронные печи для приготовления пищи. По последним данным, производство таких печей мощностью 500 Вт только японской фирмой «Мацуста» к настоящему времени превышает 500 тыс. штук в год [109, 129, 155]. У нас такие печи используются в общественных столовых и кафе, в камбузах морских судов и т. п., т. е. здесь вопрос обеспечения безопасности при эксплуатации подобной аппаратуры является весьма актуальным.

Каждый из этих факторов вносит свой вклад в общий эффект, так что в некоторых случаях найти и определить вклад отдельных источников высокой интенсивности поля в помещениях на основании общих измерений не удается и приходится прибегать к оценке конструкций отдельных блоков, шкафов и здания.

Как правило, *внутренние поля возникают от строго локализованных источников, дополненных многократными отражениями* от поверхностей стен, пола, потолка и аппаратуры. Такими источниками могут быть различные

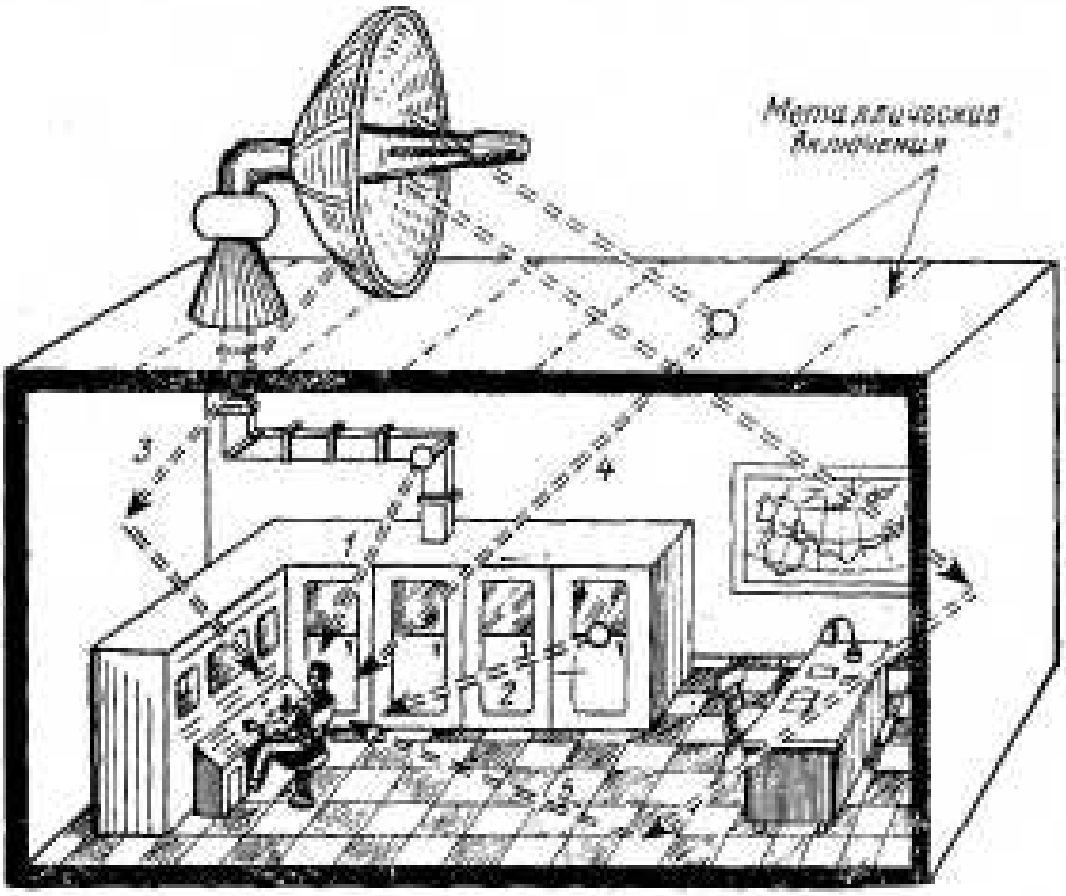


Рис. 1.2.2. Общая картина внутренних полей.

электрические утечки через неплотности (щели) в дверцах шкафов генераторов, в фланцах волноводов, в сочленяющих устройствах фазовращателей, ответвителей и т. п. Характерной особенностью таких внутренних (паразитных) излучений является то, что при облучении ими человек может оказаться на расстояниях от места излучения, много меньших длины волны, вплоть до непосредственного контакта, т. е. в ближней зоне.

Понятие ближней зоны тесно связано с полем антенны и, видимо, поэтому среди специалистов бытует разночтение терминов при разделении фактически трех разных понятий. Для дальнейшего классифицируем их следующим образом.

Зона индукции элементарного вибратора — область поля, в которой величина энергии, запасенной поочередно возникающими электрическим и магнитным полями, существенно неадиабатны, т. е. здесь имеет смысл говорить не о «перекачке» энергии из магнитной в электрическую, как это имеет место в дальней зоне, а о перекачке энергии *между полем и источником*. С приближением к источнику в пределах от $\lambda/2\pi$ и ближе интенсивность составляющих возрастает пропорционально 2—3-й степени уменьшения расстояния. Зона индукции является неотъемлемой частью поля любого излучателя, в том числе и апертурных антенн, отдельных активных вибраторов и пассивных переизлучателей. Некоторые сведения о зоне индукции элементарного вибратора приведены в § 3.1.

Ближняя зона антенн, или зона Френеля, простирается от апертуры антенны с расстояния одно — три раскрыва и плавно через промежуточную зону (приблизительно 0,1 ... 1 расстояния до границы дальней зоны) переходит в дальнюю (зона Фраунгофера), где диаграмму антенны можно считать сформированной. Подробно с представлениями о границах ближней зоны можно познакомиться в одной из последних работ Р. К. Хайкена [141].

Реактивное поле излучателей — это область зоны интерференционных явлений антенны, где внутренняя структура поля существенно реактивна, т. е. существуют выраженные минимумы и максимумы плотности потока мощности на электрической оси антенны. Необходимость выделения этой области антенн в отдельную связано с появлением в ней определенной спецификой биологического действия; границы ее весьма условны и пока могут быть определены (и то приближенно) только для осевого поля апертурных антенн: от поверхности зеркала (или элементарных излучателей вообще) начиная с долей длины волны и до расстояния, равного нескольким сотым долям границы дальней зоны апертурной антенны.

Таким образом, *основной особенностью поля щелей — обычного источника паразитных излучений — является наличие зоны индукции*. Граница же дальней зоны таких источников вследствие малости их размеров находится в непосредственной близости от них, т. е. геометрическая поле сформировано на любых расстояниях $R \geqslant 2L^2/\lambda$, где L — поперечный размер щели. Поле апертурных антенн имеет четко выраженные промежуточную и дальнюю зоны; зона индукции таких антенн находится в непосредственной близости от металлических элементов антенны, находящихся под воздействием поля. Следует помнить, что любой металлический вибратор, особенно близкий по размерам к длине волны, даже если он не является собственно элементом антенны, будучи облученным, имеет зону индукции, ин-

тенсивность поля в которой может во много раз превысить интенсивность падающей волны. Для наглядности на рис. 1.2.3 изображены зоны апертурной антенны с раскрывом много больше длины волны.

Кроме биологического аспекта, ярко выраженная интерференционная картина, устанавливаемая в закрытых помещениях с излучающей аппаратурой, создает и определенные трудности при измерении этих полей. Например, усложняется выбор параметров поля и единиц измерения этих параметров, наилучшим образом определяющих степень биологической вредности; появляются

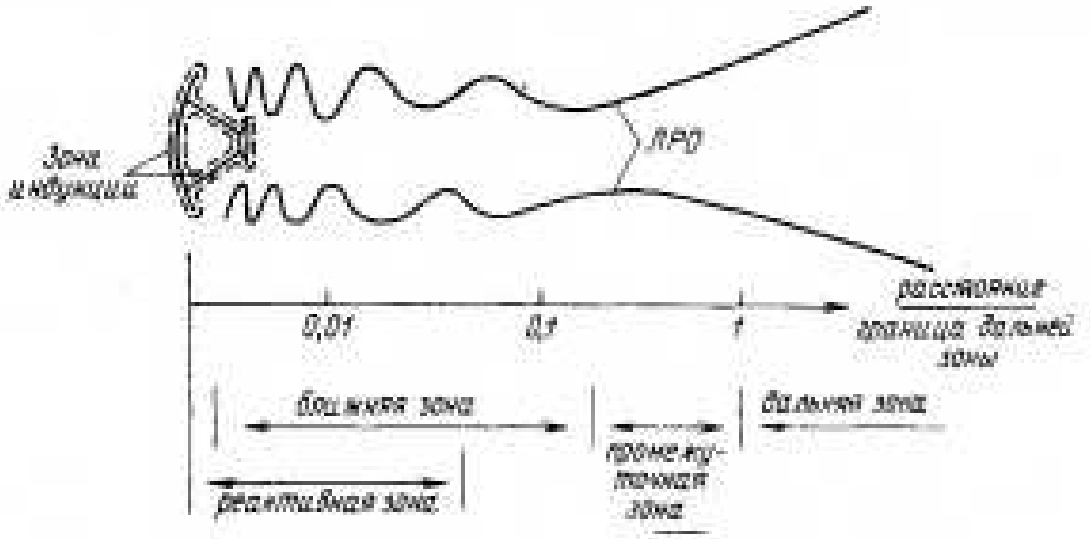


Рис. 1.2.3. Качественная картина зон апертурной антенны:
ЛРО — линия равных отношений ППМ к интенсивности осевого поля, равных 0,5.

трудности технического характера при измерении полей (которые здесь отличаются высокой пространственной фазовой и амплитудной неоднородностью) и т. д. Многие из этих трудностей пока еще не преодолены даже в теоретическом плане. Например, при измерениях обычными рупорными или вибраторными антеннами полей вблизи аппаратуры относительно низкочастотных устройств ошибка в сторону занижения может составить несколько десятков раз и более и, следовательно, результаты таких измерений не могут являться предметом сравнения с установленными нормативами по ППМ.

Естественная локализация внутренних полей в ограниченном пространстве и относительная простота технических возможностей снижения интенсивности внутренних полей до необходимого минимума позволяют при

Таблица 1.2.2

Антенны, рассматриваемые гигиеной СВЧ

Вид антенны	Общая характеристика	Тип антенны	Основные параметры	Их обычные значения
Излучающие антенны мощных РТС	Узконаправленные, многоэлементные Размеры много больше длины волны	Зеркало, рупор, многовибраторная система, антенная решетка	Ширина диаграммы направленности или коэффициент усиления	0,1 . . . 10° 20 . . . 60* дБ
			Уровень бокового излучения	—(10 . . . 30) дБ
			Форма диаграммы	Карандашный луч, лопатка, косеканс-квадратная и т. п.
			Способ сканирования	Механический, электрический, совместный
Антенны, используемые для измерения радиоизлучений	Слабонаправленные, одноэлементные. Размеры близки к длине волны	Электрический вибратор, рамка, рупор, логопериодическая структура	Ширина диаграммы направленности	10 . . . 60°
			Эффективная поверхность	0,5 . . . 2000 см²
			Коэффициент стоячей волны напряжения*	1,1 . . . 10
			Широкополосность	1,2 . . . 20
			Пространственная изотропность или коэффициент заполнения сферы**	0,7 . . . 0,98

* Для многих случаев не нормируется.
** Имеет значение для автоматических измерительных приборов.

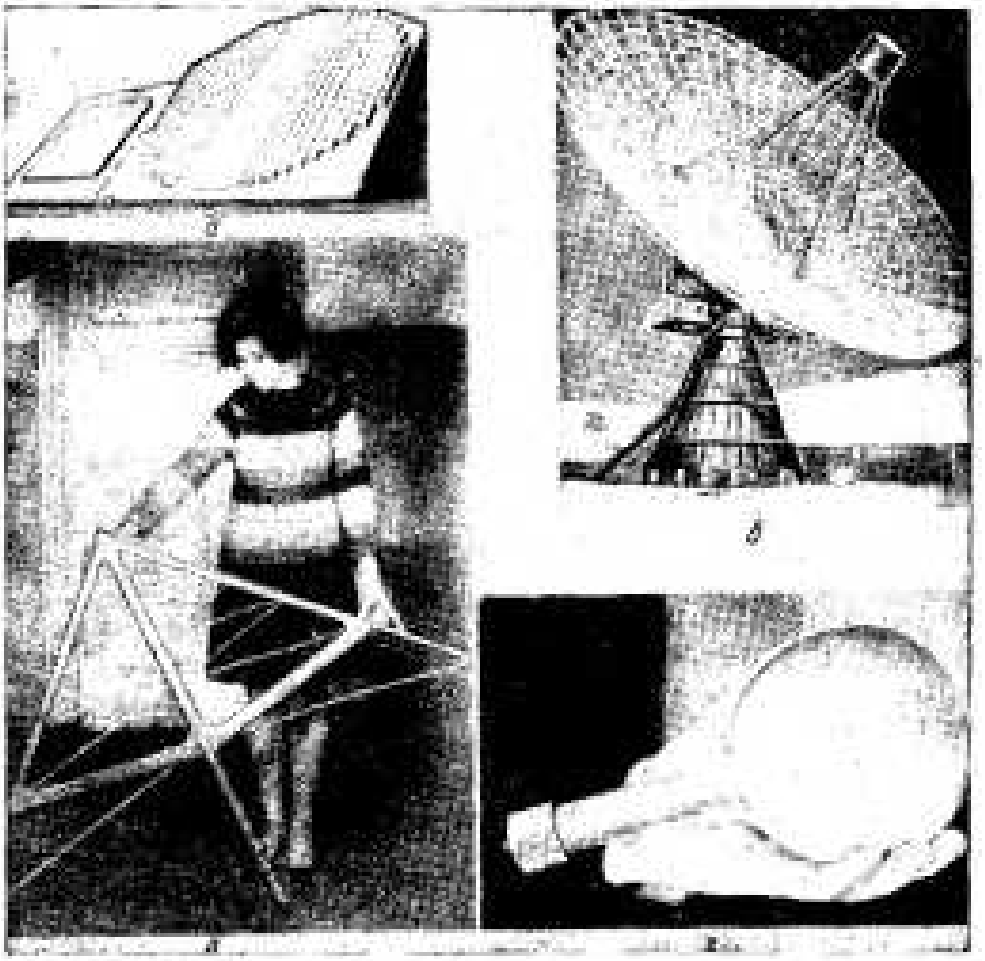


Рис. 1.2.4. Гигиену СВЧ интересуют два класса антенн: измерительные и излучающие:

а — антенна радиолокационной станции AN/FPS-85; *б* — антенна радиолокационной станции AN/FPS-49; *в* — антенна П6-23 [75] прибора ПЗ-1, предназначенного для измерения интенсивности поля в диапазоне 150 . . . 300 МГц; *г* — антенна-зонд, применяемая для измерения интенсивности поля вблизи аппаратуры.

определенных затратах внимания, сил и средств добиться высокой степени защиты персонала по крайней мере на этапе эксплуатации аппаратуры.

Несмотря на то, что антенны СВЧ устройств, как правило, концентрируют энергию в пределах относительно малых пространственных коридоров, тем не менее значительная часть излучаемой энергии (доля ее колеблется в очень широких пределах: от единиц до десятков процентов) рассеивается в пространстве в виде четко сформированных боковых лепестков и «фона». Разработка и строительство антенн с малым уровнем паразитных излучений требует больших затрат. Кроме удорожания антенных систем, работы, связанные с уменьшением пара-

зитных антенных излучений, непременно связаны с изменением остальных характеристик РТС, и на это обычно не идут.

В диапазоне СВЧ применяются антенны самого различного назначения и устройства [198]. Нас будут интересовать в основном антенны, создающие поле, т. е. излучающие антенны, и антенны, используемые как приемные зонды и позволяющие регистрировать поле. Антенны, конструкция которых не содержит материалов с нелинейными свойствами или элементами, удовлетворяют принципу взаимности. В соответствии с этим принципом основные параметры антенн не зависят от того, в каком режиме она используется: в режиме приема или в режиме передачи. Однако конструктивно приемные и передающие антенны часто существенно отличаются друг от друга. Это различие заметно при сравнении СВЧ измерительных антенн и антенн-излучателей мощных радиотехнических систем (табл. 1.2.2, рис. 1.2.4).

Коротко измерительные антенны будут рассмотрены ниже (гл. 6), а здесь мы остановимся на антеннах-излучателях, входящих в состав мощных наземных РТС СВЧ, представляющих наибольшую опасность для человека.

1.2.3. Излучающие антенные системы наземных РТС. На основе анализа зарубежных патентных материалов и теоретических работ [78, 144 и др.] можно выделить два основных направления развития антенных систем наземных РТС: создание больших антенн зеркального (рефлекторного) типа с механическим перемещением и фазированных решеток с электрическим перемещением луча. Все эти антенны относят к классу апертурных, т. е. к классу антенн с явно выраженной апертурой. Такие антенны, несмотря на конструктивные особенности устройств отдельных классов, имеют ряд общих характеристик, зависящих от распределения поля по апертуре. В частности, приблизительно одинаковы уровни боковых лепестков зеркал и достаточно гладких решеток (если $2\pi d/\lambda < 0{,}3$, где d/λ — расстояние между элементами решетки в длинах волн), причем даже при сложном амплитудном и фазовом распределениях в апертурах. Однако при определении потенциальной опасности приходится учитывать и ряд особенностей поля антенн каждого класса. В частности, к особенностям зеркальных антенн можно отнести следующее:

1. Возможность появления прямого излучения облучателя из-за «переливов» энергии через края зеркала. Для антенн с высоким уровнем облучения краев зеркала и для многозеркальных антенных систем опасность появления поля переливов с энергией высокой плотности велика. С приближением к антенне интенсивность поля переливов возрастает приблизительно обратно пропорционально квадрату расстояния и вблизи антенны уже представляет основную опасность.

2. Повышение общего уровня фона из-за влияния элементов крепления, особенно заметного на больших углах относительно оси основного излучения.

3. Повышение уровня фона из-за диффузионного отражения от шероховатостей зеркала, также заметного на больших углах.

4. Дифракция на краях зеркала.

О характере этих полей можно судить по приведенным на рис. 1.2.5 угловым зависимостям интенсивности каждой из перечисленных составляющих.

Антенное поле можно условно расчленить на 5 областей (рис. 1.2.6): основной лепесток *1* — зона преимущественного сосредоточения мощности, ближнее боковое поле *2*, дальнее боковое поле *3*, заднее излучение *4*, если рефлектор несплошной, и поле «переливов» через края зеркала (рефлектора) *5* и контррефлектора *6*.

На малых углах места антенны (обычный случай) территория подвергается облучению от всех областей поля, хотя степень облучения оказывается весьма различной. При работе «в зенит» опасности подвергается территория вблизи антенны, которая облучается энергией, проникающей сквозь рефлектор и проходящей мимо него. Наиболее тяжелый случай — *работа на отражательных углах наклона антенны*. Все три характерных случая облучения антенным полем представлены на рис. 1.2.7, *а—в*.

При перемещении диаграмм направленности в пространст-

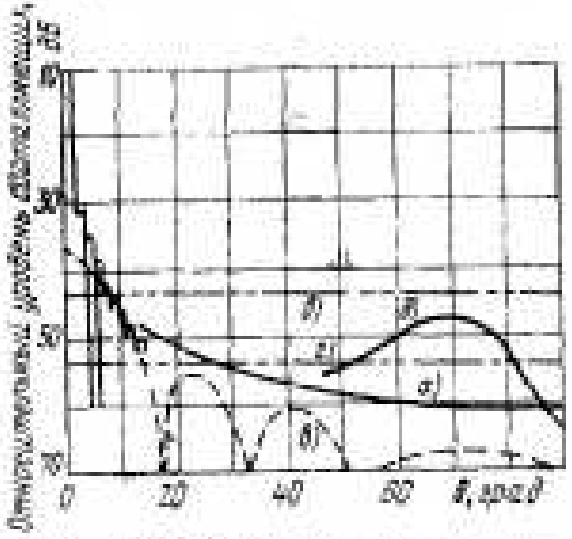


Рис. 1.2.5. Оценочные характеристики, показывающие относительный уровень различных факторов в диаграмме направленности ($\lambda = 7{,}5$ см):

а — дифракция на краях зеркала; *б* — рассеяние на элементах крепления первичного облучателя (диаметр 0,1λ); *в* — рассеяние на дополнительном согласующем осевом отражателе; *г* — рассеяние на неоднородностях поверхности отражателя (максимальные неровности поверхности 2,5 мм); *д* — прямое излучение первичного облучателя [136].

ве, например, азимутальным вращением прямоугольной антенны, наиболее мощное поле будет воздействовать на биообъект только при прохождении основного луча «над головой», т. е. когда проекция луча на землю будет совпадать с местонахождением объекта. При отклонении от этого положения поле будет уменьшаться, но степень снижения оказывается существенно различной в зависимости от расстояния до антенны: на больших расстояниях оно спадает

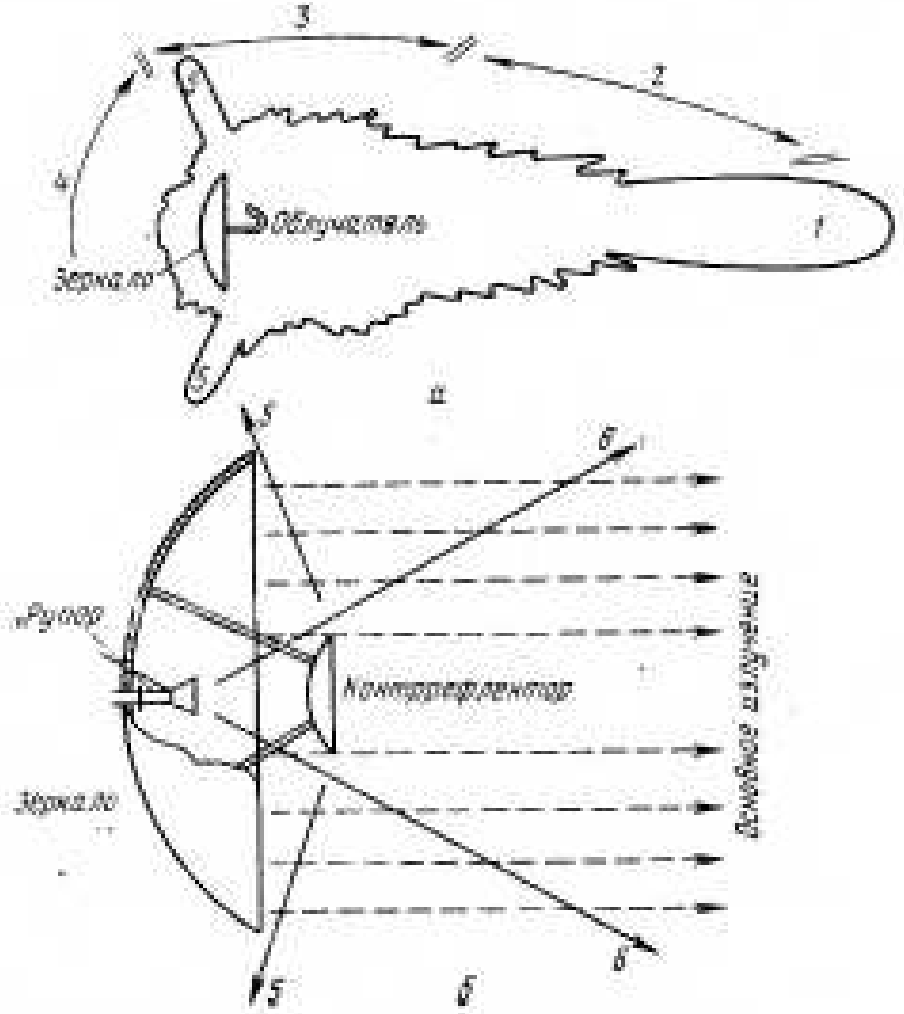


Рис. 1.2.6. Угловые области антенного поля:

а — области поля однозеркальной антенной системы; б — образование побочных излучений двухзеркальной системы за счет «огибания» электромагнитной энергии мимо зеркала и контррефлектора.

На рис. 1.2.6,а и 1.2.7 нанесены линии равных плотностей.

фактически до нуля даже при небольшом отклонении антенны. В этом случае принято говорить о «выделенном» облучении. На меньших расстояниях необходимый угол отклонения антенны увеличивается, а в непосредственной близости от антенны основное поле становится трудно выделить из «фона». Картина поля «впереди» тем более искажается из-за действия поля переливов у двухзеркальных антенн. Азимутальные диаграммы излучения зеркальных антенн (в дальней зоне) приведены на рис. 1.2.8 [136].

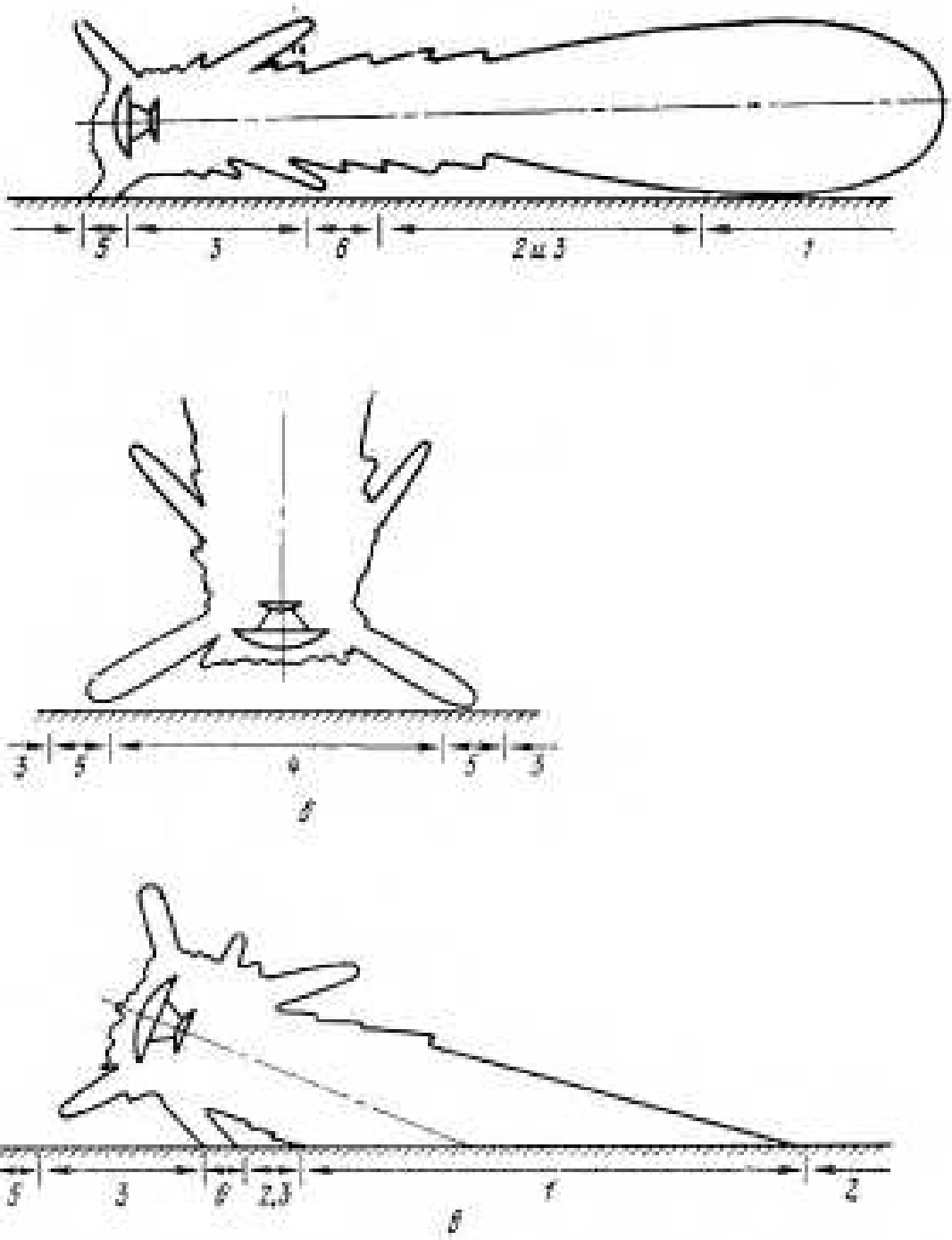


Рис. 1.2.7. Облучаемость территории антенным полем при некоторых основных положениях двухзеркальной антенны:
а — малые углы; б — положение антенны «на зенит»; в — наклон антенны ниже горизонта.

Для **антенных решеток** характерны диаграммы направленности с более сильными боковыми лепестками, чем у зеркальных антенн, особенно если элементы решетки являются ненаправленными излучателями и если число элементов не очень велико. В этом случае появляются так называемые интерференционные (дифрак-

ционные) максимумы, намного превышающие средний фон (рис. 1.2.9).

Разнообразие практических требований к формам диаграмм направленности антенн радиотехнических систем связи, радиолокации, радионавигации привело к конструированию антенн, формирующих в пространстве целый набор отличающихся по форме диаграмм: карандашный (или игольчатый) луч, косеканс-квадратную диаграмму, V-образный луч, плоскую диаграмму («лопаточного» типа) и даже луч, сходящийся на определенном расстоянии (сфокусированный луч).

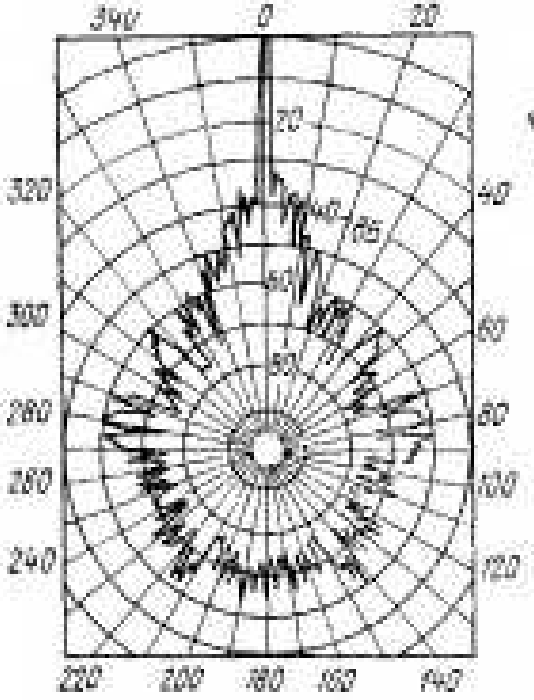


Рис. 1.2.8. Азимутальная диаграмма антенн, работающих на волне 6 ГГц [136].

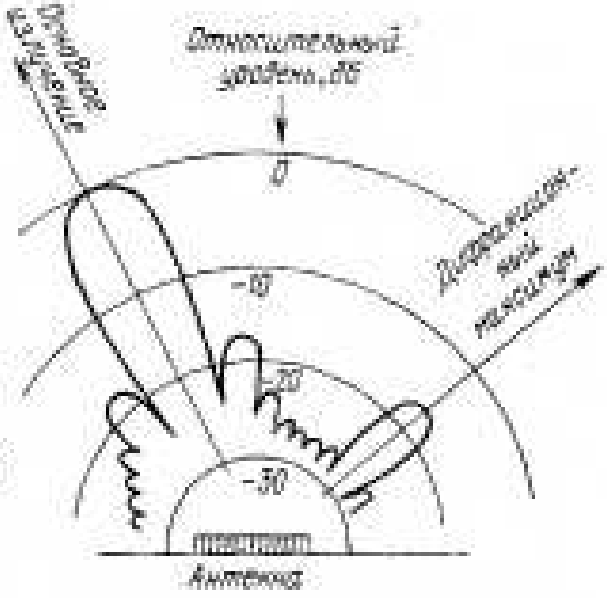


Рис. 1.2.9. Диаграмма направленности антенной решетки с явным дифракционным максимумом при отклонении диаграммы от центрального положения.

В принципе любая из этих диаграмм может быть сформирована как зеркалами (обычно со сложной кривизной или набором облучателей), так и антенной решеткой. Для формирования карандашного луча используются круглые или квадратные апертуры, для сужения диаграммы направленности в какой-либо плоскости размеры антенны в этой плоскости соответственно увеличивают. Например, азимутальные сканеры (радиолокационные станции поиска и обнаружения) имеют антенны,

удлиненные в горизонтальной плоскости, а угломестные сканеры (станции определения высоты цели) — удлиненные в вертикальной плоскости [141].

Станции автосопровождения, осуществляющие после захвата непрерывное слежение за целью, имеют сканирующий карандашный луч или неподвижный раздвоенный.

Общим для апертурных антенн является относительное постоянство плотности мощности в луче на малом расстоянии (в зоне Френеля) и последовательное уменьшение плотности мощности на больших расстояниях (начиная с границы зоны Фраунгофера и далее — обратно пропорционально квадрату расстояний). Поэтому для приближенных расчетов осевой плотности используются следующие выражения.

Для $R \leqslant L^2/2\lambda$

$$П_s = 4P_{изл} \cdot 10^2/S; \qquad (1.2.1)$$

для $R \geqslant L^2/\lambda$

$$П_s = P_{изл} G \cdot 10^2/4\pi R^2, \qquad (1.2.2)$$

где $П_s$ [мкВт/см^2]; $P_{изл}$ [Вт]; S [м^2], R [м] — расстояние «расчетная точка — антенна», L [м]. Коэффициент 4 в формуле (1.2.1) учитывает неравномерность освещения апертуры (см. § 4.2 и 4.3).

В последнее время появились антенны с переменной фокусировкой, фокус которых может быть установлен не в бесконечности, а где-либо в зоне Френеля (т. е. ближе $2L^2/\lambda$). Сфокусированные апертуры могут концентрировать в сравнительно небольшом объеме пространства значительную долю излучаемой энергии. При этом плотность мощности в фокусе, естественно, значительно возрастает (рис. 1.2.10). ППМ в фокусе особенно велика при малом фокусном расстоянии, при этом повышается и опасность воздействия поля на технику или человека [67, 142].

Если пространственные диаграммы направленности характеризуют распределение плотности мощности в пространстве, а следовательно, и величину поля в интересующей нас точке пространства в зоне действия антенны, то временные параметры облучения антенным полем определяются характером перемещения луча в пространстве. К настоящему времени механические методы обзора пространства сохраняются во многих системах радионавигации, аэродромного обслуживания,

гидрометеообслуживания, противосамолетной обороны и т. п., однако, судя по литературным данным последних лет, сейчас с большой интенсивностью разрабатываются и внедряются электронные методы управления лучом [67].

Из всех функций перемещения луча в пространстве простейшей является *периодическое перемещение луча* в одной — горизонтальной («горизонтальный сканер») или вертикальной («вертикальный сканер») плоскости. При растровой развертке луч перемещается в двух плоскостях, просматривая последовательно всю зону обзора. Механическими системами перемещения чаще всего формируется спиральный растр, электронными — прямоугольный (типа телевизионного).

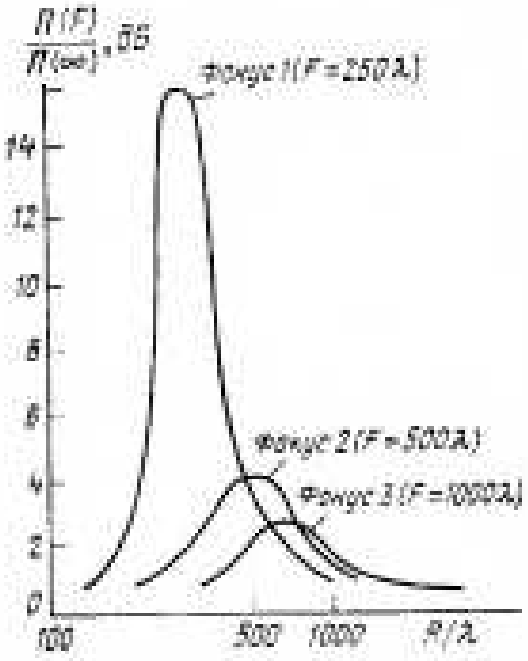


Рис. 1.2.10. Возрастание осевой плотности мощности сфокусированной апертуры:
F — фокусное расстояние; $\Pi(\infty)$ — ППМ для фокусного расстояния $F=\infty$; приняты за единицу.

Перечисленные способы обзора пространства являются периодическими, и это позволяет проводить прогноз времени облучаемости полем на основании известных законов перемещения луча. По-иному обстоит дело в системах с *программным обзором* пространства, реализуемого при управлении с помощью счетно-решающих устройств фазированных решеток, состоящих из регулируемых дискретных элементов [67]. Программный обзор в общем случае характеризуется отсутствием заметной периодики, и поэтому оценка временных характеристик облучаемости полем в зоне таких РТС может проводиться только на основании статистических данных.

Для современных радиотехнических комплексов, в частности на кораблях, на узлах связи и т. п., характерна насыщенность антеннами относительно небольших пространств, а их поля — высоким частотным, амплитудным и временным разнообразием [78, 79]. Анализ полей этих антенн позволяет сделать определенные выводы

в отношении потенциальной опасности их воздействия на человека, а именно:

1. Уровни осевой плотности мощности антенных излучений современных станций намного превышают допустимые.

2. Радиусы опасных зон по осевому и боковому полю этих станций составляют единицы и десятки километров, и при длительном воздействии на объекты поля станций могут представить опасность (для человека и для некоторых видов техники).

Антенны большинства станций — перемещающиеся, причем функции обзора пространства разнообразны.

Диапазон интенсивностей полей в радиусе действия современных РТС может составлять от единиц ватт на квадратный сантиметр до пренебрежимо малых величин, т. е. превышать 50...60 дБ; соответственно меняется степень опасности их воздействия. Для оценки биологической опасности на основании действующих нормативов для проектирования методов и средств защиты необходимо определение величины этих полей с заданной точностью методами радиопрогноза и радиометрии, которые будут рассмотрены ниже.

Экологический фактор электромагнитной части биосферы Земли характеризуется появлением вблизи мощных генераторных и излучательных установок значительных по интенсивности высококогерентных излучений (табл. 1.1), воздействие которых на человека представляет зачастую опасность для его здоровья. В некоторых случаях применением эффективных средств защиты или специальной организацией труда удается свести возможность переоблучения к минимуму. Иногда этого сделать нельзя, и тогда приходится прибегать к различного рода лечебным мероприятиям, снижающим вредное действие радиоволн.

Интересно заметить, что первыми исследователями биологического действия радиоволн были физики — пионеры в исследовании электромагнитных волн, известные ученые Генрих Герц, первый проводивший опыты с воздействием радиоволн на выделенные мускул и нерв лягушки; продолжившие его опыты Оливер Лодж и Точ, которые, в частности, нашли, что «даже чрезвычайно сильное действие быстропеременным током не производит никакого эффекта (я понимаю под этим: никакого стимулирующего — О. Лодж). Единственным результатом подобных явлений, если они продолжаются в течение известного времени, является временный паралич в уста-

лость нерва... Этот паралич проходит со временем сам собой» [55]. Первые опыты над человеком, очевидно, были проведены Николой Тесла и Д'Арсонвалем [23, 55].

Таблица 1.1

Плотность мощности СВЧ излучений в зоне действия типовых исследовательских, промышленных и бытовых СВЧ установок (ориентировочные данные) [53, 61, 109, 194а]

Источники излучений и характерные точки измерения (расчета)	ППМ, мкВт/см²
Генераторы маломощных установок СВЧ (мощность до 1 Вт, работа на полуволновые антенны)	
в апертуре антенны	100 . . . 10 000
на расстоянии 1—2 м (в луче)	1 . . . 100
у открытых ВЧ разъемов (на расстоянии 10 см)	1 . . . 10
у неплотностей фидеров и шкафов с аппаратурой	менее 1
общий фон в помещении с генераторной аппаратурой	менее 1
Генераторы промышленных РЛС и средств связи	
в апертуре антенны	10^3 . . . 10^5
в луче на расстоянии 1—2 км	10^2 . . . 10^4
у неплотностей фидеров и шкафов с аппаратурой	1 . . . 100
общий фон в помещении с генераторной аппаратурой	1 . . . 100
Палубы и надстройки пассажирских, транспортных судов морского флота	от единиц до сотен
Палубы и надстройки судов траловото и рефрижераторного флота	единицы и сотни
Установки для плазменных исследований (предназначенных для термоизоляции, исследования взаимодействия плазмы с электронным пучком и т. д.)	
при нормальном состоянии аппаратуры	0,1 . . . 17
при открытых дверцах	до 44
Радиорелейные линии СВЧ	менее 10
СВЧ плиты для приготовления пищи	иногда более 1 000

Определить биологическую опасность радиоволн для разработки нормативов облучаемости и необходимых инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий позволяют экспериментальные биофизические и клинические исследования, рассмотрению которых посвящена гл. 2.

2. БИОФИЗИКА СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЙ. МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ВРЕДНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ

Совершенствование методов нормирования воздействий радиоизлучений и защиты от них позволили до минимума сократить вредные их последствия, снизить выраженность СВЧ патологии *. Но в некоторых случаях внезапные воздействия мощными полями (в аварийных ситуациях и т. п.) и хронические длительные воздействия полями малых уровней, которые иногда встречаются в практике производства и эксплуатации радиоаппаратуры, могут представить определенную опасность. Поэтому изучение биологического действия радиоволн является важной отраслью радиогигиены, и гигиены СВЧ в частности.

Несмотря на то, что синдром **, возникающий в результате воздействия СВЧ, иногда предлагается называть обобщающим (но, видимо, излишне четким) понятием «СВЧ болезнь», клинические проявления его — «синдром СВЧ», «болезнь СВЧ» — нельзя считать специфическими, присущими только этому фактору. Специфический характер действия радиоволн поэтому проявляется не столько в разнообразии клинических форм, лечении и профилактике этого действия, сколько в сложности взаимоотношений физических характеристик поля СВЧ с биологическими и физиологическими характеристиками организма.

Отсутствие четкого детерминизма в подобных взаимоотношениях определяет наблюдающиеся обычно многообразие и расплывчатость клинической картины и неоднозначность экспериментальных данных, в особенности если они получены при воздействиях очень малых уровней СВЧ.

---

* СВЧ патология — частный вид профпатологии. Профессиональная патология — нарушение жизненных функций и органические повреждения — является следствием воздействия на человека профессиональных вредностей, к которым относят токсические вещества, производственные пыли, ионизирующие излучения, токи ультравысоких частот, СВЧ, вибрации, интенсивный производственный шум, метеорологические условия, изменения атмосферного давления, физические перенапряжения, частые однотипные движения, инфекционные и паразитные заболевания, вызываемые неблагоприятными условиями труда.

** Характерный комплекс симптомов.

Описанию биофизики этих взаимоотношений, по возможности в обобщенном виде, и посвящена гл. 2. Сюда же включены и некоторые вопросы методологии исследования биологического действия радиоволн. Она написана с целью общего ознакомления с вопросом, на наш взгляд, достаточно хорошо рассмотренным в специальной литературе *, на основании которой и написана глава.

2.1. БИОФИЗИКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СВЧ НА ОРГАНИЗМ

Воздействие мощных электромагнитных полей на человека приводит к определенным сдвигам в нервно-психической и физиологической деятельности, однако, как предполагают, «многоступенчатая» система защиты организма от вредных сигналов, осуществляемая на всех уровнях — от молекулярных до системного, — в значительной степени снижает вредность действия «случайных» для организма потоков информации. Поэтому, видимо, если и наблюдается определенная реакция на эти поля и очень часто при уровнях, значительно ниже тех, которые необходимы для возникновения энергетического взаимодействия **, то *здесь можно говорить скорее о раздражающем, чем о поражающем эффекте*, т. е. скорее, о физиологическом в общем смысле, чем о патологическом аспекте воздействия электромагнитной энергии.

Итак, несмотря на то, что нетепловые, или специфические, эффекты воздействия радиоволн открыты относительно давно, определяющим для нормирования опасности работы в условиях воздействия ЭМП во многих странах пока принята степень их теплового действия.

2.1.1. Биофизика теплового действия радиоволн СВЧ. Для выяснения биофизики теплового действия радио-

---

* Наиболее полно библиография использованных в данной главе работ приведена в [23, 35, 118]. Вопросы ранней диагностики и льгот рассмотрены соответственно в работах [83 и 153].

** Например, при 10^{-4} В/м наблюдался сосудистый условный рефлекс у человека; при $3 \cdot 10^{2}$ В/м — изменение слюноотделения у собаки; при 20 мкВт/см^2 — изменение энцефалограммы у кролика и даже при 0,3 мкВт/см^2 — изменения эпителиальных и промежуточных клеток животных (и это вместо предполагаемых на основе тепловой теории: 200 В/м, 10 мВт/см^2 для ВЧ и СВЧ соответственно!). Для клетки чувствительность оценивается величиной энергии 10^{-10} Дж/клетку.

волн СВЧ на живые организмы рассмотрим кратко факторы, определяющие нагрев тканей при облучении их ЭМП. Вот главные из них

1. Существование потерь на токи проводимости и смещения в тканях организма приводит к образованию тепла при облучении. Количество тепла, выделяемое в единицу времени веществом со средним удельным сопротивлением $\rho_{ср}$ (Ом·см) при воздействии на него раздельно электрической и магнитной составляющих на частоте f (Гц), определяется следующими зависимостями:

$$Q_E = 8{,}4 \cdot 10^{-20} \cdot \rho_{ср} f^2 E^2 \text{ [Дж/мин]}, \qquad (2.1.1)$$

$$Q_H = 8{,}4 \cdot 10^{-16} \cdot \rho_{ср} f^2 H^2 \text{ [Дж/мин]}.$$

Доля потерь в общей величине поглощенной телом энергии возрастает с частотой; в частности, потери на релаксацию молекул воды в тканях возрастает с 50% на частоте 1 ГГц до 98% на частоте 30 ГГц.

2. Наличие отражения на границе «воздух — ткань» приводит к уменьшению теплового эффекта на всех частотах приблизительно одинаково; с увеличением частоты от 100 МГц до 24,5 ГГц наблюдается уменьшение коэффициента отражения k_0 на 20...30% (табл. 2.1.1).

Таблица 2.1.1

Коэффициент отражения k_0^2 от границ между тканями при различных частотах

Границы раздела	Частота, МГц						
	100	200	400	1 000	3 000	10 000	24 500
Воздух—кожа	0,758	0,684	0,623	0,570	0,550	0,530	0,470
Кожа—жир	0,340	0,227	—	0,231	0,190	0,230	0,220
Жир—мышцы	0,355	0,351	0,300	0,260	—	—	—

С учетом k_0^2 плотность мощности, поглощаемая телом, будет равна

$$П_{погл} = П(1 - k_0^2), \qquad (2.1.2)$$

3. Глубина проникновения энергии СВЧ в глубь тканей (для затухания в e раз) зависит от резистивных и диэлектрических свойств ткани и от частоты (табл. 2.1.2).

Жировой слой играет роль «трансформатора импедансов» между воздушной средой и мышцами, уменьшая

Таблица 2.1.2

Глубина проникновения энергии СВЧ в различные ткани при изменении поля в e раз, в долях длин волн

Ткань	λ, см							
	300	150	75	30	10	3	1,25	0,86
Головной мозг	0,012	0,028	0,028	0,064	0,048	0,053	0,059	0,043
Хрусталик глаза	0,029	0,03	0,056	0,098	0,05	0,057	0,055	0,043
Стекловидное тело	0,007	0,011	0,019	0,042	0,054	0,053	0,036	0,036
Жир	0,068	0,083	0,12	0,21	0,24	0,37	0,27	—
Мышцы	0,011	0,015	0,025	0,05	—	0,10	—	—
Кожа	0,012	0,018	0,029	0,056	0,066	0,063	0,058	—

отражение и увеличивая поглощенную мощность в мышечной ткани [23, 167].

4. Соизмеримость размеров тела с длиной волны приводит к появлению существенной частотной зависимости взаимодействия поля с телом, однако описать ее математически оказывается весьма трудно. Пример такой зависимости для простейшего случая — полупроводящей сферы — показан на рис. 2.1.1, из которого видно, что изменение радиуса всего лишь на 10 ... 15% может изменить относительное поглощающее сечение сферы S (отношение мощности, поглощаемой в полупроводящей сфере, к мощности, падающей на ее поперечное сечение при распространении плоской волны в воздухе) в десятки раз. При $d \ll \lambda$ (так называемая рэлеевская область) с увеличением объекта поглощаемая им энергия возрастает пропорционально 4-й степени его радиуса. Это

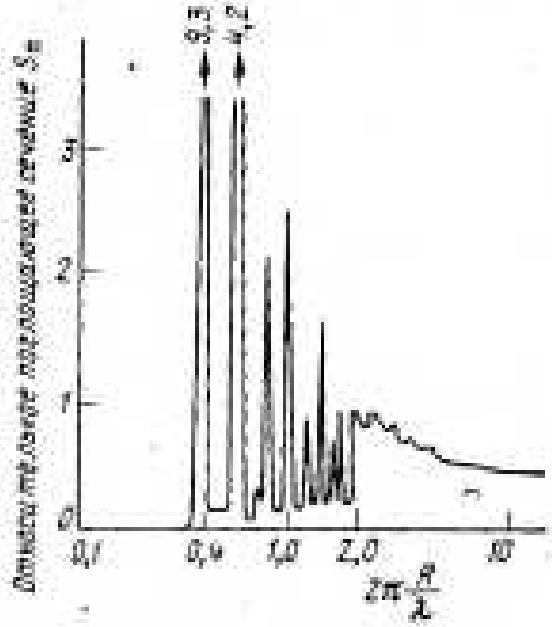


Рис. 2.1.1. Поглощение энергии плоской волны ($\lambda = 10{,}4$ см) в полупроводящей сфере ($\varepsilon' = 60$, $\sigma = 0{,}1$ См/м) в зависимости от отношения радиуса сферы R к длине волны λ.

заставляет сделать вывод о чрезвычайно высокой зависимости эффекта облучения тела человека от поляризации и ракурса освещения его радиополем СВЧ в реальных условиях; впрочем причина влияния поляризации может крыться просто в изменениях доли поглощаемой энергии.

5. Существование между различными слоями тела слоев с малой диэлектрической проницаемостью приводит к возникновению резонансов—стоячих волн большой амплитуды. Образование таких областей облегчается значительным (в 3...10 раз, см. табл. 2.1.3) уменьшени-

Таблица 2.1.3

Коэффициент уменьшения длины волны $k_{тк}=\lambda_в/\lambda_{тк}$ для частот 100...35 000 МГц

Ткань	$\lambda_в$, см							
	300	150	75	30	10	3	1,23	0,83
Головной мозг	9,7	7,8	6,5	6	5,7	5	6,1	4,1
Хрусталик глаза	9	6,7	5,9	5,7	5,7	5,2	6,1	4,1
Стекловидное тело	13	11,5	9,4	6,8	8,5	7,6	8,8	5,4
Жир	3,14	2,6	2,5	2,4	2,6	2,07	1,8	—
Мышцы	11	9,2	8	7,3	—	5	—	—
Кожа	10,8	8,3	7,5	6,8	6,8	6	4,9	—

ем длины волны в тканях по сравнению с длиной волны в свободном пространстве (частота, однако, остается неизменной!). При этом уже на расстоянии $R \geqslant \lambda_{тк}/(1 \ldots 2)\pi$ *устанавливается волна с параметрами* $E_{тк}$ и $H_{тк}$, *определяемыми свойствами ткани* вне зависимости от характера падающей волны. Уменьшение длины волны уменьшает и минимальные объемы, необходимые для установления стоячих волн, которые приводят, в частности, к так называемым микронагревам. При экспериментальных облучениях животных замечался как отрицательный, так и положительный градиент изменения температуры от поверхности внутрь тела.

6. Перераспределение тепловой энергии между соседними тканями через кровь наряду с конвекционной отдачей энергии теплоиспусканием в окружающее пространство во многом определяет температуру нагреваемых участков тела. Именно из-за ухудшенной системы отвода

тепла от некоторых сред (глаза и ткани семенников — в них очень мало кровеносных сосудов) эти органы тела наиболее уязвимы для облучения. Например, при облучении глаз кролика энергией плотностью от 0,12 до 0,6 Вт/см² образовывается катаракта при времени облучения, соответственно, от 270 до 5 мин (рис. 2.1.2). При этом температура внутри глаза поднимается на 4...16 °С (критическим для глаз считается повышение температу-

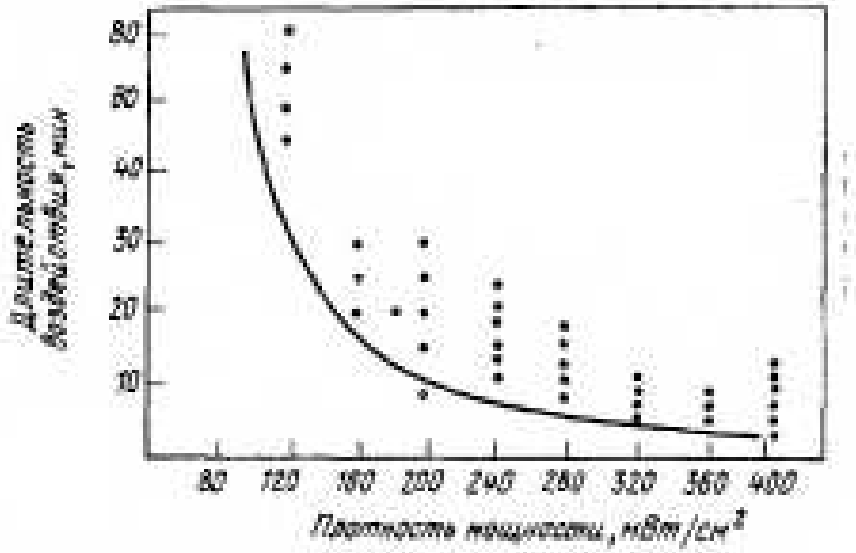


Рис. 2.1.2. Значение пороговых величин плотности мощности при разных длительностях однократного облучения на частоте 2450 МГц для глаз кролика.

ры на 10 °С). Высокая чувствительность семенников к облучению связана с известным фактом, что при нагревании их всего на 1 °С возникает частичная или полная временная стерилизация. Минимальное пороговое значение плотности мощности облучения для семенников (при длительном воздействии) составляет 5 мВт/см².

2.1.2. Специфическое действие радиоволн СВЧ. Несмотря на то, что предположение о специфическом действии радиоволн было высказано еще в середине сороковых годов, до 1952 г. экспериментально они обнаружены не были [194]. Обнаружить и исследовать прямыми методами специфическое действие радиоволн и в настоящее время оказывается задачей довольно трудной, так как оно сводится к тончайшим изменениям в организме и проявляется, как правило, лишь косвенно. Эти изменения сейчас принято объяснять несколькими причинами. Одной из них считается наличие в биосредах «микропроцессов», связанных с так называемым явлением

«жемчужной цепочки» (выстраиванием суспендированных частиц ряда веществ, в том числе лейкоцитов и эритроцитов, параллельно электрическим силовым линиям), «диэлектрическим насыщением» в растворах белков и других биологических макромолекул (которое приводит к разрыву внутри- и межмолекулярных связей), участием сил Лоренца, приводящих к перемещению в электролите положительных и отрицательных ионов в направлении, перпендикулярном направлению магнитных силовых линий.

Наибольший интерес представляют явления, связанные с резонансным поглощением ЭМП белковыми молекулами, которое, в частности, объясняется существованием в обычных средах множества конфигураций распределения в молекуле протонов, мало отличающихся по величине свободной энергии. Из-за флуктуаций распределения протонов могут происходить диполь-дипольные взаимодействия, стимулированные дополнительным квантом энергии в пределах верхнего диапазона СВЧ.

Открытие явления резонансного поглощения в биосферах имеет большое значение для понимания процессов, протекающих в живых организмах при воздействии радиоизлучений. В частности, с явлением резонансного поглощения тесно связано мутагенное действие микроволн.

С усложнением биологического вещества неизменно усложняется процесс его взаимодействия с электромагнитным полем. Например, при *объяснении чувствительности нервных клеток* к ЭМП считаются вероятными следующие механизмы действия:

— детектирование ЭМП в мембране нервной клетки;

— влияние ЭМП на подвижность ионов, в частности на способность проникать через мембрану нервной клетки;

— изменение калийного градиента внутриклеточной среды;

— «упорядочивание» колебаний ионов под воздействием поля, приводящее к изменению характера и величины чувствительности рецепторов;

— влияние на собственные частоты предполагаемого электромагнитного обмена, особенно вероятного для ансамбля клеток и тем более всего организма.

С развитием и усложнением организма кроме простейших физико-химических механизмов все большее и

большее влияние на организм в целом оказывают эффекты, которые принято связывать с так называемыми физиолотическими и биофизическими механизмами действия, включающими как неразрывное целое информационный аспект радиоволн. Эти и другие, еще более сложные, процессы, сейчас, возможно, еще не до конца ясные, определяют вторичные эффекты воздействия поля, которые происходят, как правило, на дотепловых энергиях. Это — кумуляция, стимуляция, сенсибилизация, возникающие как следствие развитой способности сложных систем накапливать тепловое и информационное воздействие.

Кумуляция приводит к тому, что при воздействии прерывистого облучения суммарный эффект накапливается и зависит от величины эффекта с самого начала воздействия; при перерывах в воздействии увеличивается общее время облучения, необходимое для появления данного эффекта.

Сенсибилизация заключается в повышении чувствительности организма после слабого радиооблучения к последующим воздействиям (в опытах на СВЧ к значительно более мощным облучениям, вблизи летального порога).

Стимуляция — улучшение под влиянием поля общего состояния организма или чувствительности отдельных его органов. Например, на притепловых энергиях наблюдается стимулирующее действие микроволн: улучшение чувствительности глаз человека, адаптированных к темноте; на более высоких интенсивностях этот эффект не отмечается [176, 184]. Некоторые реакции целостного организма на СВЧ воздействия можно описать следующим образом: чувствительность организма к воздействию энергии СВЧ начинается при средних уровнях, порядка долей микроватт на квадратный сантиметр и до единиц милливат на квадратный сантиметр продолжается фаза угнетения; далее наступает фаза стимуляции, а на плотностях более 10 мВт/см² снова наступает фаза угнетения.

Относительно недавно обнаружено дезадаптирующее действие СВЧ излучений — снижение приспособляемости организма к другим видам воздействия, в частности к шуму, рентгеновским излучениям, тепловому воздействию [119а, 147а]. К специфическим эффектам воздействия радиоволн, связанным с волновой структурой поля, можно отнести и влияние поляризации и ракурса освеще-

ния. Из биофизических экспериментов известно, что изменение расположения тела по отношению к векторам поля может привести к резкому изменению эффективности воздействия радиоволн, в частности, к изменению числа летальных исходов среди животных. Известно также, что изменение направления прихода волны облучающего поля также в значительной степени влияет на эффективность воздействия. Наиболее опасным считается облучение по оси грудь — спина, наименьшее — с ног. Кроме изменения площади поперечного сечения, большую роль здесь играет соотношение размеров тела с длиной волны.

Наконец, как мы увидели выше, организм животного и человека небезразличен к локализации электромагнитной энергии на определенных органах. Как уже отмечалось, наиболее чувствительными к облучению в настоящее время считаются семенники и глаза. Характерно, что если рассматривать поле как непосредственно раздражающий фактор центральной нервной системы, то теоретически установленной границей такого воздействия считаются 1000...3000 МГц. Это же подтверждается последними экспериментальными исследованиями [168, 169]. Чувствительность органов к воздействию радиоволн резко повышается, если в них имеются те или иные металлические включения, тем более если они соизмеримы с длиной волны.

Может возникнуть вопрос, почему организм сам в ходе эволюционного процесса не выработал механизмы, регулирующие состояние нашего организма в оптимальных пределах. Причину этого открыли совсем недавно. Вкратце идея этого открытия заключается в следующем.

Поведение организмов, вся их деятельность подчинена не интересам особи, а интересам вида. Удалось понять, что не стимулируются и не могут стимулироваться сами собой механизмы борьбы с неблагоприятными причинами, следствия которых проявляются *после среднего в роду возраста воспроизводства*: эти механизмы находились и находятся вне рамок, вне сферы действия естественного отбора. Внутри этих рамок замкнуты связи (т. е. стимулируются механизмы), направленные только на увеличение количества потомства и увеличение жизнеспособности молодого организма до появления потомства (рис. 2.1.3 и 2.1.4). После среднего возраста воспроизводства организм предоставлен самому себе, и ни одна из причин (в том числе и воздействие СВЧ поля), следствия которых проявляются в этот период, не включена в цепь ни положительной, ни отрицательной обратных связей и поэтому не может ни затухнуть, ни возгореться сама, если только она не ведет к самоустранению или не повернута вопреки ему нашими разумом и волей. Или — или. Только этим можно объяснить, почему в нас находят место поло-

жительные мотивации некоторых наших поступков, наклонностей и вкусов, например по отношению к определенной пище, музыке и т. п., несмотря на их явно пагубное действие [33, 52, 120, 128].

Сейчас на биологическом уровне нами руководят механизмы, которые мы унаследовали от наших далеких предков, в частности, отработанные еще на этапе господства естественного отбора меха-

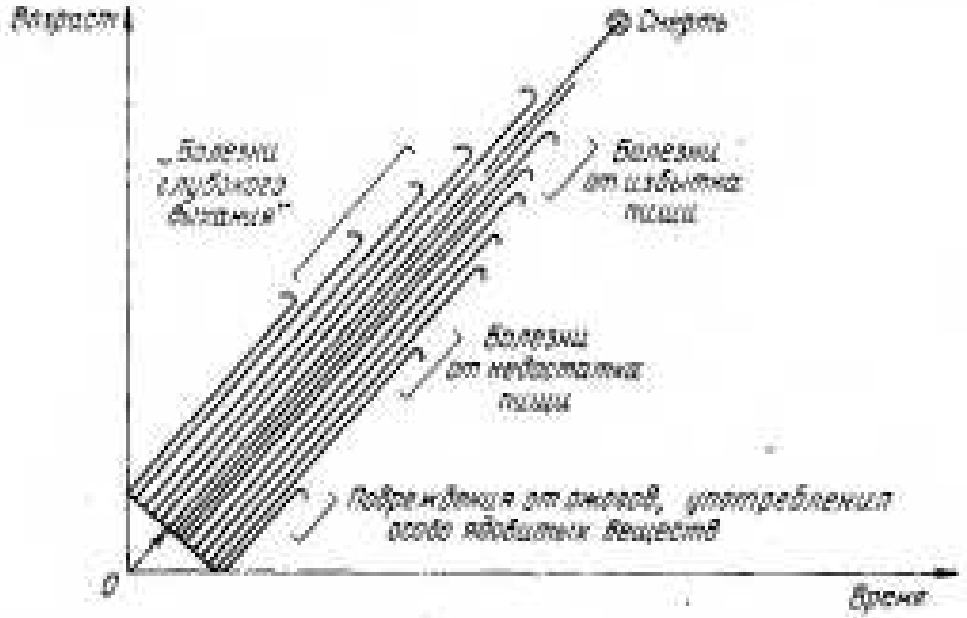


Рис. 2.1.3. Систему биологических механизмов, регулирующих всю жизнедеятельность организма, можно представить в виде плотного жгута прямых в системе координат возраст—время. Повреждения механизмов, вызывающие те или иные расстройства, изображены на рисунке в виде изгибов прямых (расположение относительно условное).

низмы положительных и отрицательных обратных связей, направленные на поддержание в нас высшего тонуса до среднего в роду по мужской линии возраста воспроизводства.

Все это, видимо, действительно заставит признать заслуживающей внимание точку зрения, согласно которой *механизмы естественного отбора больше не кажутся нам безусловно полезными*. Впрочем, в справедливости природе отказать нельзя: каждый из нас, по-видимому, одарен механизмами самоустранения ровно настолько, насколько высоко мы занимаем положение на биологической лестнице, получив его по наследству или завоевав своей волей.

Некоторые приемы биологического самосовершенствования были известны давно [33, 86, 195], но постепенно под давлением ряда причин они оказались забытыми или были оставлены в рудиментарном состоянии. Сейчас это положение активно исправляется [3, 16, 29, 52, 90, 120, 126]. Попытки отработки эффективных и применимых в массе способов использования собственных защитных сил организма для профилактики вредных последействий воздействия СВЧ [23] пока более чем скромные. Они предприняты фактически заново без использования уже имеющегося богатейшего опыта борьбы за здоровье, накопленного тысячелетиями и с успехом подтвержденного в наши дни [16, 106, 107, 115а, 121 и др.].

На основе гигиенической оценки СВЧ облучения и описанных клинико-физиологических данных по *функциональным* изменениям под действием радиоволн СВЧ советские исследователи еще до 1956 г. определили предельно допустимые уровни для волн 3- и 10-см диапазонов. На основе этих определений в СССР установлены действующие поныне предельно допустимые интенсивности облучения микроволнами.

Американские ученые исходили из иной основы для установления предельно допустимых норм. За критерий вредности радиоволн СВЧ они (также до 1956 г.) прини-

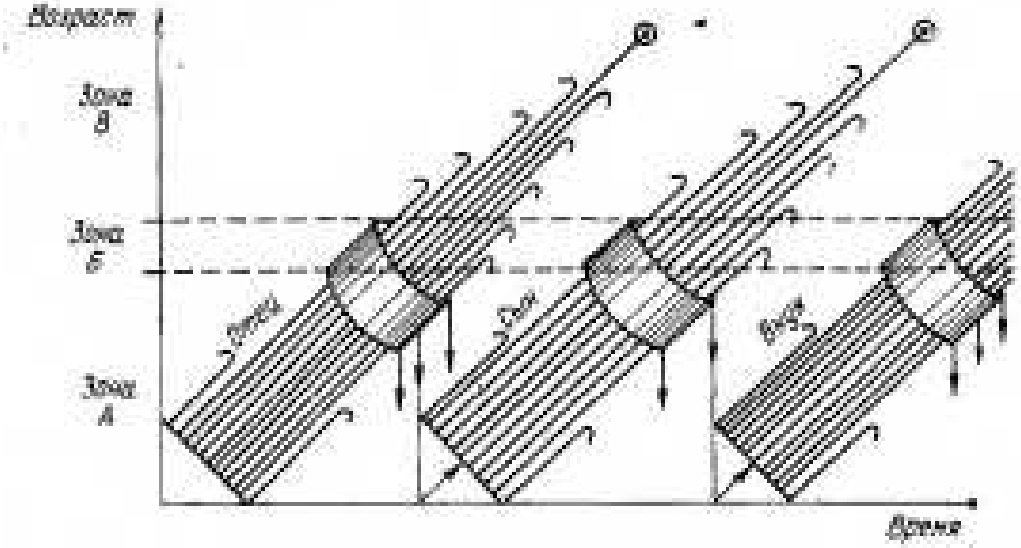


Рис. 2.1.4. Число болезней и непоправимых повреждений организма резко возрастает после среднего в роду возраста воспроизводства.

Зона *А* — период почти полной стабилизации системы, господства механизмов биологического самосовершенствования. Зона *Б* — средний период воспроизводства в роду (по мужской линии). Зона *В* — дестабилизация системы. Преобладание механизмов самоустранения.

ли не функциональные сдвиги, как правило обратимые, а более заметные морфологические изменения, предложив в качестве предельно допустимой интенсивность 0,01 Вт/см² (10 мВт/см²) вне зависимости от времени воздействия. Эта величина и была принята большинством ведомств и фирм США за основную (см. рис. 1). С принятием в США в 1966 г. единого стандарта предельно допустимый уровень (10 мВт/см²) фактически остался как основа, корректируемая в зависимости от времени облучения и температурно-влажностных условий в большую и меньшую сторону (1 . . . 100 мВт/см²). Об этих нормативах см. в гл. 3.

В Советском Союзе проводятся широкие гигиенические исследования, направленные на выяснение профессиональной вредности СВЧ радиоволн. Исследования позволили выявить у лиц, подвергавшихся хроническому СВЧ воздействию, определенные изменения со стороны нервной и сердечно-сосудистой систем, эндокринных желез, крови и лимфы, хотя в подавляющем большинстве случаев эти изменения носят обратимый характер. При хроническом действии СВЧ поля были обнаружены также случаи помутнения хрусталика и снижения обонятельной чувствительности человека [155а, 152а].

Наиболее общим эффектом действия на организм человека электромагнитных излучений малых уровней (единицы милливатт) является дезадаптация — нарушение функций механизмов адаптации, регулирующих приспособительные реакции организма к изменениям условий внешней среды (к теплу, холоду, шуму, психологической травме и т. п.), т. е. СВЧ поле является типичным стрессором. Предположение о дезадаптирующем действии радиоволн было высказано давно [118], а результаты проведенных конкретных исследований этого аспекта биологического действия радиоволн опубликованы в 1970 г. [147].

2.2. КРАТКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ СВЧ ПОЛЕЙ

Исследования влияния на организм микроволн были начаты еще в довоенные годы, однако из-за низкого технического уровня средств и методов радиометрии тех лет полученные данные потребовали тщательной перепроверки. На новом, более высоком методическом уровне изучение особенностей влияния СВЧ излучений на организм начали проводить только после окончания второй мировой войны. В нескольких тысячах работ, посвященных этому вопросу, нашли отражение все основные методики — физиологические, биохимические, биофизические, — принятые в клинике и биологическом эксперименте. Однако технические приемы обеспечения экспериментов облучения электромагнитной энергией и измерения необходимых ее параметров, разработанные в самые последние годы, пока еще нельзя считать в достаточной мере унифицированными, поэтому в ряде случаев еще наблюдается заметное различие в результатах, полученных различными исследователями (последний симпозиум в Ленинграде как раз и был посвящен устранению этого положения [119а]).

Для анализа и оценки изменений, вызванных облучениями небольших интенсивностей, в первую очередь используют методы исследования защитно-приспособительных реакций организма, а при

воздействиях больших интенсивностей — реакций, отражающих более глубокие изменения функционального состояния организма. Здесь находят применение методы исследования центральной нервной системы, вегетативной нервной системы, эндокринной, а также гормонов, медиаторов, ферментов и других биологически активных веществ, которые осуществляют регуляторные функции организма. Рассмотрим эти методы.

2.2.1. Нервная система. При исследовании влияния СВЧ полей на нервную систему особое внимание уделяется изучению центральной нервной системы (ЦНС), регулирующей активные и пассивные взаимосвязи организма с внешним миром, и вегетативной нервной системы, которая обеспечивает целостность и согласованность всех функций внутри самого организма.

Функциональные пробы вегетативной нервной системы при исследовании аппарата кровообращения включают в себя:

— определение колебаний частоты пульса при совершенно спокойном дыхании и при глубоком вдохе и выдохе;

— пробу с надавливанием на глазные яблоки (так называемая «проба Ашнера»), в результате которого вызывается замедление ритма сердечных сокращений, снижение артериального давления;

— электрокардиографию.

Для более полного выявления состояния вегетативной нервной системы в настоящее время пользуются главным образом наблюдениями за белым и красным дермографизмом, за кожной гистаминовой и адреналиновой пробой. Красный дермографизм возникает под действием механического раздражения кожи туловища как следствие расширения сосудов в результате прямой реакции капилляров. При выполнении пробы измеряют скрытый период реакции до появления покраснения кожи. Далее определяют в минутах период сохранения красноты кожи, вплоть до ее полного исчезновения. При проведении кожных проб в самые верхние слои кожи вводят гистамин или адреналин и наблюдают скрытый период, затухание реакции и размеры пятна гиперемии.

Дисфункцию, т. е. нарушение функции вегетативной нервной системы, выявляют по лабильности (подвижности) уровня сахара в крови, по склонности к понижению или повышению уровня сахара после нагрузки 50...100 г сахара — декстрозы.

Одним из признаков вегетативной перевозбудимости мускулатуры, учитываемых в исследованиях СВЧ синдрома, является тремор, т. е. непроизвольные, ограниченные по распространенности ритмичные и однообразные движения, дрожание (пальцев, век).

Известно, что вегетативная нервная система регулирует обмен веществ организма. Для проверки реактивности вегетативной нервной системы исследуют основной обмен веществ. По количеству поглощенного кислорода и выделенной углекислоты определяют дыхательный коэффициент и отсюда по калориметрическому эквиваленту кислорода вычисляют теплопродукцию в калориях за 24 ч, выражающую обмен в покое натощак, или основной обмен. Влияние СВЧ поля на центральную нервную систему обнаруживают и при наблюдении за поведением животных и при исследовании условных и безусловных рефлексов.

Действие электромагнитных полей СВЧ на поведение животных проявляется в изменении общей двигательной активности, в стремлении животных уйти из зоны воздействия, в ориентировочных реакциях на СВЧ поля. Исследование влияния СВЧ излучения

на условнорефлекторную деятельность проводится в двух основных направлениях: 1) СВЧ поле используют как условный раздражитель при выработке условнорефлекторных реакций; 2) изучают влияние СВЧ излучений на условнорефлекторные реакции, вызванные другими условными раздражителями; используют обычно пищедобывательные, двигательные, электрооборонительные условные рефлексы. Условнорефлекторные методики применяют и при изучении действия СВЧ облучения на потомство.

В ряде исследований, проведенных за последние годы, были обнаружены реакции головного мозга на действие СВЧ поля, выражающиеся в структурных изменениях, а также в изменении биоэлектрической активности структур мозга. Электроэнцефалографические исследования проводят при воздействии СВЧ поля на голову, на отдельные участки тела и, наконец, при общем воздействии. Регистрацию биоэлектрической активности начинают до воздействия СВЧ излучений и продолжают во время и после воздействия: в некоторых опытах из-за наводок на электроды — только до и после воздействия или применяются специальные высокоомные отведения. Исследования проводят на интактных (неповрежденных) животных, в головной мозг которых вживляют электроды; на животных, в головном мозгу которых электрокоагуляцией были разрушены отдельные подкорковые структуры; на препаратах изолированного мозга (перерезка на уровне среднего мозга) и, наконец, на изолированной полоске коры головного мозга. По мнению ряда исследователей, электрофизиологические методы позволяют регистрировать изменение функционального состояния ЦНС при значениях ППМ порядка 1 мкВт/см^2. В настоящее время характер изменения электроэнцефалограммы служит одним из критериев оценки состояния здоровья специалистов, работающих с генераторами СВЧ.

Наконец, еще одним, крайне важным способом изучения биологического действия СВЧ на нервную систему является изучение химического состава нервной ткани и изменений качественного и количественного состава, которые возникают в ней в процессе нервной деятельности. Однако анализ литературных данных показывает, что биохимические методы почти не нашли своего применения в этих исследованиях. Исключение составляет методика определения фермента холинэстеразы, отмеченная ниже.

2.2.2. Эндокринные железы. В тесном взаимодействии с вегетативной нервной системой гормоны эндокринных желез в своих взаимосвязях образуют функциональные системы, которые поддерживают на нормальном уровне углеводный, белковый, минеральный и водный обмены, как и весь обмен веществ в целом, а тем самым жизнь вообще.

Исследование функций желез внутренней секреции проводят, используя: 1) изучение сдвигов в картине крови — подсчет числа эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, эозинофилов, определение содержания гемоглобина, времени свертывания крови; 2) определение содержания аскорбиновой кислоты в надпочечниках, по которому можно судить об активности гипофиза; 3) прямое определение в крови и моче гормонов коры надпочечников. Последние методы позволяют прямо судить о состоянии гормонообразовательной функции гипофиза и надпочечников.

Изучение функций половых желез животных включает в себя исследование динамики веса семенников, макро- и микроструктуры

их и личинок, а также степени жизнеспособности (рост, вес, продолжительность жизни) потомства животных, облученных в период беременности.

Уровень функционального состояния щитовидной железы определяют: 1) по уровню йода в крови, 2) пробой с нагрузкой радиоактивным йодом (принцип метода основан на том, что дают людям внутрь определенную дозу радиоактивного йода и исследуют накопление его в щитовидной железе и выделении с мочой; 3) по уровню содержания сахара и холестерина в крови.

2.2.3. Кровь и лимфа. Кровь и связанная с ней лимфа, являясь внутренней средой организма, выполняют ряд исключительно важных физиологических функций. Несмотря на непрерывное поступление в кровь и выведение из нее различных веществ, химический состав крови в норме довольно постоянен. Все случайные колебания в составе крови в здоровом организме быстро выравниваются.

Напротив, при многих патологических состояниях наблюдаются более или менее резкие сдвиги в химизме крови. Отсюда понятно значение химических и физико-химических исследований как цельной крови, так и плазмы. Клиническое значение анализов крови определяется также тем, что их можно делать многократно.

Как указывалось выше, при изучении действия СВЧ поля в крови определяют число эритроцитов, лейкоцитов, тромбоцитов, эозинофилов, содержание гемоглобина и т. д. Определение содержания в крови ионов Na, K, Ca, Cl, общее содержание белка, сахара, холестерина позволяют судить о нарушениях минерального, белкового, углеводного и жирового обмена.

1. Белковый обмен. Одним из показателей состояния белкового обмена является общее содержание белков в крови и соотношение отдельных белковых фракций. Уже в начальных стадиях развития различных профессиональных заболеваний, в том числе под действием СВЧ, наблюдаются сдвиги как в содержании белков, так и в соотношении их фракций. Для определения белковых фракций используют различные методы. Очень часто применяют метод электрофореза, принцип которого заключается в том, что скорость движения различных белков в электрическом поле различна и зависит от отношения величины заряда молекул белка к его массе. В строго одинаковых условиях эта скорость постоянна для каждого индивидуального белка, что дает возможность разделить их на отдельные группы.

2. Углеводный обмен. Обычно определяют содержание гликогена, сахара в крови, сахара и пировиноградной кислоты в моче. Иногда возникает потребность исследовать кривую изменения содержания сахара в крови после нагрузки глюкозой. При влиянии СВЧ поля возможно нарушение активности отдельных ферментных систем, участвующих в расщеплении углеводов. Методы определения этих нарушений не выходят за рамки стандартных.

3. Жировой обмен. Как указывалось выше, в клинических условиях и в лабораторных экспериментах при изучении влияния СВЧ поля на обмен жиров наибольшее распространение получил метод определения холестерина, основанный на цветной реакции, возникающей при взаимодействии уксусного ангидрида, ледяной уксусной кислоты, серной кислоты и холестерина.

4. Обмен минеральных солей. При СВЧ воздействии наблюдаются изменения в содержании хлоридов, натрия, калия, кальция, фос-

фатов. Натрий и калий определяются методом пламенной фотометрии, хлориды, фосфаты, кальций — титрометрическим методом.

5. Обмен витаминов. Методы определения содержания витаминов в крови и моче занимают важное место при изучении биологического действия СВЧ. Так, довольно четким является снижение содержания витамина С, тиамина (витамин B_1), которые определяются флуорометрически.

6. Ферменты. Определение активности ферментов используют для ранней диагностики многих профессиональных заболеваний. Изменение активности холинэстеразы крови может быть ранним показателем воздействия СВЧ излучения. Из методов определения активности холинэстеразы в крови удобен колориметрический, основанный на определении интенсивности цветной реакции в монохроматическом свете. В настоящее время разработаны экспресс-методы определения активности ферментов. Они ценны своей простотой, скоростью, надежностью и возможностью осуществления в любой лаборатории. Создан целый ряд микро- и ультрамикрометодик, при которых для исследования употребляют крайне малое количество биологического материала.

Методы, упомянутые выше, достаточно полно характеризуют способы исследования всех основных реакций организма на воздействие СВЧ полей.

Заключая рассмотрение биологического действия радиоволн СВЧ, попробуем кратко оценить те успехи, которые достигнуты наукой к настоящему времени. Прежде всего, получены неопровержимые данные о влиянии СВЧ на организм человека и животных. Были получены экспериментальные данные по определению количественных характеристик этого влияния. Некоторые из них, наиболее характерные, приведены в табл. 2.1. Даже поверхностный анализ этих данных показывает, что исследователи предпочитают диапазон интенсивностей 5 ... 10 мВт/см² и выше. И это легко объяснить: ведь на интенсивностях ниже этих величин получаемый эффект очень мал, он теряется в естественных «шумах» организма, определяемых внутренними, происходящими в организме, и внешними по отношению к нему процессами *. Имеющиеся в таблице данные на уровне ниже 0,1 ... 1 мВт/см² просто подтверждают имеющуюся чувствительность организма (точнее, его отдельных систем) к воздействию СВЧ — так же, как, например, действует на наш глаз свет (как известно, для этого достаточно всего двух-трех квантов). При длительном воздействии

* Для выявления изменений в организме вследствие влияния доли малых интенсивностей зачастую пользуются весьма тонкими математическими методами (см., например [115]).

Таблица 2.1

Некоторые данные о воздействии СВЧ поля на человека и животных, расположенные по шкале интенсивностей

П	
3	Катаракта глаз собаки после облучения в течение 10 мин
2	
↑ Вт/см² 1,0	Катаракта глаз собаки после облучения в течение 3...5 ч
мВт/см² 8	
6	(н. ч.)* Болевое ощущение при облучении
5	
4	
3	Кратковременное повышение кровяного давления; через 20 ... 60 мин — резкое падение (у кошки, кролика, собаки)
2	(н.) Уродства потомства после облучения в течение 10...15 мин куриных яиц (λ=12,6 см); гибель кошек и кроликов (t=20...60 мин). Угнетение окислительно-восстановительной способности ткани
10^2	(ч.) При включении повышение кровяного давления с последующим резким спадом; при хроническом
8	воздействии — стойкая гипотония. Стойкие морфологические изменения со стороны сердечно-сосудистой системы. Двухсторонняя катаракта
6	Учащение, затем замедление и остановка сердца
5	лягушки
4	(н.) Морфологические изменения в легких (разрыв капилляров и множественные кровоизлияния, λ=
3	=3...10 см), в печени (расширение сосудов и кровоизлияния, λ=10 см). Подъем кровяного давления на 20...30 мм рт. ст. (облучение в течение 0,5...1 ч)
2	(н.) Повышение окислительно-восстановительной способности ткани
10	(ч.) Изменение условнорефлекторной деятельности, морфологические изменения в коре головного мозга (н.)
8	Неопределенные сдвиги со стороны крови (время
6	облучения 150 ч), изменение свертываемости крови. Гиперплазии клеток печени λ=3...10 см, (хроническое воздействие). Электрокардиографические изменения (длины волн, кроме дцв). Измененые в рецепторном аппарате
5	Пороговая интенсивность, при которой замечены изменения в семенниках и изменения кровяного давления
4	(облучение многократное). Непродолжительная лейколения и эритропения. Помутнение хрусталика
3	(ч.) Выраженный характер снижения кровяного давле-
2	ния, учащение пульса, колебания объема крови сердца

Продолжение табл. 2.1

П	
мВт/см² 1,0	(ч.) Снижение кровяного давления, тенденция к учащению пульса, незначительные колебания объема крови сердца. Понижение уровня кровяного давления; снижение офтальмотонуса (*t*: ежедневно 3,5 месяца). Дезадаптация, расстройка механизмов управления иммунологической защиты (и).
8	
6	
5	
4	Угнетение соковыделения у собак
3	(и., ч.) Некоторые изменения со стороны нервной системы при облучении в течение 5 . . . 10 лет
2	Неврозы у собак
10^{0}	(и.) Электрокардиографические изменения, лиц
8	
6	
5	
4	(и.) Тенденция к понижению кровяного давления при хроническом воздействии
3	
мкВт/см² 20	(ч.) Урежение пульса, тенденция к снижению артериального давления. Наблюдаемые случаи чувствительности организма. Выраженное повышение температуры кожи у лиц, подвергавшихся ранее СВЧ воздействию.

Примечание. Данные, отмеченные буквой ч, относятся к человеку, остальные — к животным; значения ППМ, отмеченные буквой и, являются вижими из указанных авторами.

полями выше 0,1 мВт/см² появление физиологических приспособительных реакций, в отличие от патологических, на уровнях выше 10 . . . 100 мВт/см².

На уровнях плотностей порядка сотен микроватт на квадратный сантиметр заключение о вредном действии на организм СВЧ излучений заявляется авторами исследований не столь единогласно, как может показаться после просмотра гл. 2. Например, известна работа Ф. И. Поляковой [23], которая нашла, что под влиянием поля с интенсивностью около 1 мВт/см² точность реагирования животных на движущийся объект повышалась. О стимулирующем действии поля СВЧ сообщалось и в других работах, например [118]. В литературе приводилось даже заявление одного испытуемого об улучшении самочувствия (уменьшении раздражительности) под влиянием СВЧ излучений. Все это в общем согласуется с учением И. М. Сеченова, И. П. Павлова и Л. А. Орбели о положительном трофическом влиянии слабых раздражителей.

При $П > 5 \ldots 10$ мВт/см² и хроническом действии полей меньших интенсивностей наблюдается, как правило, отрицательное влияние облучения; появляется повышенная утомляемость, слабость, вялость, разбитость, а также раздражительность, головокружение. Иногда наблюдаются приливы к голове, чувство жара, половая слабость (по типу ослабления влечения), приступы тошноты и даже потемнение в глазах.

Генетические последствия воздействия радиоволн изучены пока недостаточно. В одной из лабораторий США серьезно исследуется вопрос о корреляции между рождением монголоидных детей (болезнь Дауна) с облучением их отцов СВЧ энергией. Найдено, что большинство таких детей имеют отцов, облученных во время второй мировой войны радиополем локаторов [194а].

Из объективных симптомов можно назвать следующие: эмоциональная лабильность (непостоянство), равномерное оживление сухожильных рефлексов, гипергидроз, стойкий дермографизм, снижение чувствительности кожи к ультрафиолетовым лучам и др. Обнаружено дезадаптирующее действие радиоволн. Большинство эффектов были обратимыми и, как правило, прекращались на 3-й — 4-й день после прекращения облучения *.

Кроме интенсивности, другим более или менее исследованным на сегодня параметром поля СВЧ является *время* воздействия, но эти исследования, при которых оно специально учитывалось, были проведены лишь на высоких уровнях, притом касаются лишь *общего* времени облучения и почти не включают изучения влияния временных характеристик модуляции.

К настоящему времени неизвестно, проводятся ли исследования влияния на организм или хотя бы учет в эксперименте отдельных составляющих электромагнитного поля СВЧ, которые, между тем, могут резко изменить условия воздействия облучения и потому должны учитываться хотя бы в первом приближении. Этим и некоторым другим вопросам, связанным с нормированием поля СВЧ, посвящена гл. 3.

---

* Заключение к гл. 2 написано по материалам работ К. П. Малоканова [103], Н. В. Тягина [153], а также монографии под ред. И. Р. Петрова [23], за исключением работ, ссылки на которые сделаны в тексте.

3. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Наиболее важным биофизическим аспектом радиогигиены и медикобиологической науки в целом является установление количеств и форм воздействия электромагнитных полей, потенциально опасных для человека, т. е. *нормирование*. Критерии опасности могут быть различными: например, определенная доля летальных исходов или необратимых отрицательных последствий, кратковременное снижение трудоспособности до минимально возможного уровня, еще обеспечивающего выполнение определенной задачи; появление обратимых последствий, ухудшение самочувствия или, наконец, появление первых выраженных реакций организма и гипотетически установленных «генетических последствий». В зависимости от обстоятельств выбирается тот или иной критерий.

Нормирование включает в себя как первый и весьма важный элемент выбор критерия, ибо различие в величинах энергий, биологически эквивалентных * всем перечисленным выше критериям, составляет огромную величину, $10^{10}...10^{12}$ раз. На современном этапе развития радиобиологии неионизирующих излучений в условиях мирного времени как при хроническом, так и при стрессорных воздействиях автоматически проявляются только три критерия: 1) снижение производительности труда; 2) «чувствительность к воздействию», т. е. появление первых выраженных признаков реакции организма на радиоизлучение как на воздействующий фактор в целом или его отдельные параметры; ухудшение самочувствия, 3) появление едва уловимых обратимых последствий **.

---

* Биологический эквивалент — максимальная величина действующего параметра (в простейшем случае — энергия), допустимая при заданном (выбранном) критерии безопасности, степени снижения производительности труда за определенный отрезок времени (обычно за неделю), и т. п.

** Это привело в свое время к появлению нормативов с очень большим «коэффициентом запаса». В последнее время в военной литературе серьезно ставится вопрос о так называемом многоуровневом нормировании [87]. В соответствии с этой работой, требования к *военному* нормированию должны быть следующими: оно должно быть динамическим (зависеть от времени воздействия, от неблагоприятных факторов среды и т. п.), дифференцированным (в зависимости от функционального состояния организма, возраста, от требований, предъявляемых к специалисту, и от условий боевой работы), многоуровневым — в частности, зависимым от ответственности работ, выполняемых специалистом, от цены ошибки. Предлагается ввести

На выбор критерия, а следовательно, биологического эквивалента, кроме биофизических данных, весьма заметное влияние оказывают этнографические и социальные факторы, а также моральные и этические нормы, которым следуют конкретные лица, занимающие ключевые позиции в этой области.

Для определения критерия опасности в радиобиологии ионизирующих излучений в самое последнее время предлагается *концепция оправданного беспорогового риска*, которая, в отличие от существующей до сих пор концепции порогов опасности и коэффициентов безопасности, предполагает учет степени повышения риска для человека при действии на него какого-либо фактора, например радиации.

Действительно, радиация, СВЧ поле добавляют лишь какую-то часть к общему риску смерти, болезни или потери трудоспособности из-за действия других самых разнообразных факторов, воздействию которых может подвергаться человек в течение всей своей жизни. Риск в любом виде человеческой деятельности оправдывается получаемой при этом пользой, которая, считается, не может быть получена иным путем. В идеальном случае риск за счет действия неблагоприятного фактора должен компенсироваться извлекаемой пользой, но этот подсчет удается сделать пока лишь в очень редких случаях, и при выборе величины предельного риска (за всю жизнь индивида) его пока приходится соизмерять с риском в других, наиболее благоприятных, неопасных видах человеческой деятельности.

Для снижения опасности облучения, установленной для всей жизни, дозы действующего фактора за более короткий период — год, месяц — приходится лимитиро-

---

три вида норм: допустимые (ДУ), или эксплуатационные, — для обычных условий эксплуатации или при выполнении ответственных работ, связанных, например, с сохранением жизни значительного контингента людей; предельно допустимые (ПДУ), предусматривающие снижение эффективности боевой работы до определенного уровня, и предельно переносимые (ППУ), которые могут быть установлены для аварийных режимов и т. п. Превышение ППУ грозит выходом из строя личного состава. *Гражданское* нормирование должно отражать снижение производительности труда под действием неблагоприятных условий труда (психофизиологических и санитарно-гигиенических, в том числе и СВЧ воздействий). Попытка увязать эти факторы с производительностью труда сделана В. А. Крыловым [75]. Результаты его работы использованы нами при написании п. 7.4.4.

вать годовые, месячные пределы дозы, устанавливая тем самым определенные коэффициенты запаса.

Выбор критерия опасности может считаться правильным, если он хотя бы приблизительно совпадает с критериями, выбранными для нормирования других санитарно-гигиенических и психофизиологических профвредностей. Такого совпадения при существующих сверхжестких нормативах СВЧ пока еще наблюдать не удается.

Идеальной (гипотетической) схемой установления допустимых пороговых норм была бы следующая (по М. Левину):

1) численно выражается изменение совокупности характерных показателей организма под воздействием электромагнитного поля (точнее, его характерных параметров);

2) устанавливаются экстремальные значения этих показателей, которые могут быть приняты допустимыми для человека на основании тех или иных критериев;

3) устанавливается однозначная функциональная связь между показателями реакций организма и тем или иным параметром или группой параметров электромагнитного поля;

4) устанавливается значение параметра или группы параметров электромагнитного поля, который согласно п. 2 считается допустимым для человека; это значение и принимается в качестве нормативного.

Однако на практике эта схема не может быть реализована по следующим причинам.

1. Воздействие электромагнитного поля на живой организм, как это показано выше, чрезвычайно разнообразно, и вопрос о численном выражении действия электромагнитного поля в целом в настоящее время даже не ставится. Реакция организма на действие электромагнитного поля характеризуется чисто качественными понятиями, соответствующими состоянию организма, как то: «чувствительность к воздействию», «ухудшение самочувствия», «появление определенных обратимых последствий» и т. д. Одно или несколько из перечисленных состояний и принимается за критерий допустимого действия электромагнитного поля.

2. Реакция организма зависит не только от количества энергии электромагнитного поля, поглощенной организмом, но и от частоты поля и, как показывают наблюдения, от других параметров поля, в частности параметров импульсной модуляции. Поэтому установить однозначное соответствие между состояниями организма и одним или небольшой группой параметров поля не представляется возможным.

Поэтому в качестве нормируемого параметра электромагнитного поля принята энергия электромагнитного поля, падающего на единицу площади поверхности человека при частоте, соответствующей наиболее выраженной реакции организма. Такой способ нормирования является данью практической невозможности пронормировать все параметры электромагнитного поля, которые определяют воздействие поля на организм человека.

При изучении биологической стороны вопроса нормирования любого фактора, в том числе и СВЧ поля, наи-

более ответственен выбор достаточно информативных и доступных для экспериментального исследования действительно «критических» показателей организма. Некоторые из этих показателей приведены в § 2.2; в работе А. Н. Либермана, М. С. Саковской, В. В. Оробея, И. Э. Бронштейн и А. П. Чеснокова [119а] в качестве таких показателей выбрано количество хромосомных перестроек, плодовитость, некоторые количественные характеристики потомства (вес, процент выживаемости, степень вырождения и т. д.), а также иммунологические показатели состояния организма.

Для удобства практического использования норм в них записана допустимая ППМ в зависимости от времени облучения, а необходимая для биофизических экспериментов и практических работ измерительная СВЧ аппаратура строится в виде измерителей плотности потока мощности*. При взаимодействии живого тела с электромагнитным полем переплетается масса эффектов, из которых на первый план обычно ставят тепловые. Тепловой нагрев — это простейший вид преобразования энергии в биологических средах. Расчет выделенного тепла обычно не вызывает особых трудностей и, как правило, хорошо подтверждается экспериментально; он во многом соответствует наблюдаемым физиологическим эффектам и поэтому в настоящее время принят во всех известных нормативах за основу при нормировании радиооблучений СВЧ. Действительно, именно на СВЧ обнаруживается наибольшее поглощение радиоволн телом человека (коэффициент поглощения близок к 0,5 [117]), степень опасности легко связывается с допустимым нагревом определенных жизненноважных органов (глаза, гонады).

Другой важный параметр облучения, характеризующий воздействующую на биообъект энергию, — время усреднения импульсных сигналов — определяется пока не соображениями биологического характера, а *постоянной времени применяемых измерителей*. Таким образом, сейчас измеряется ППМ средняя за период повторения генерируемых импульсов, но максимальная за

---

* В странах Запада ППМ является единственным регистрируемым параметром практически во всем диапазоне радиочастот (от 10 кГц до 100 ГГц [85, 173]), при этом имеется в виде плотность мощности, усредненная за определенное время (по новому стандарту США — за 6 мин).

период повторения импульсов, определяемых перемещением луча в пространстве (например, из-за вращения антенны). До сих пор для большинства ситуаций было характерно четкое разграничение между значениями этих периодов в первом и во втором случаях (различие составляло несколько порядков), а на редкие промежуточные случаи, не охватываемые нормативами, приходилось просто не обращать внимания. Обычным считалось (для диапазона СВЧ) и облучение бегущей волной. Между тем, сейчас, с появлением антенных систем с электрическим сканированием и постепенным заполнением существующих «пустот» в частотах повторения воздействующего на человека СВЧ поля, далеко не всегда оценка степени воздействия ЭМП на человека только по уровню плотности мощности оказывается достаточно полной. Поэтому в некоторых случаях, рассмотренных ниже (сейчас они *не приняты официально*, но встречаются в практике все чаще и чаще), принятую оценку поля по уровню ППМ приходится дополнять или заменять другими методами — методами оценки воздействия по энергии (а не раздельно по уровню поля и времени); изменяются представления и о регистрируемых параметрах воздействующего поля, необходимых и достаточных для полной оценки биоэффективности.

3.1. О выборе регистрируемых параметров электромагнитного поля

Можно выделить три основные причины разнообразия в выборе регистрируемых параметров поля при разработке измерительной аппаратуры и методов измерения, проводимого в интересах защиты человека:

1) усложненность и разнообразие электромагнитной обстановки, с которой приходится сталкиваться на практике;

2) ограничения в возможностях измерительной аппаратуры;

3) наличие специфических биоэффектов, открытых в последнее время

Если поместить в поле бегущей волны радиоконтрастное тело, каковым, в частности, является организм человека или животного для воздушной среды, картина поля из-за отражений от поверхности раздела сред нарушается, появляются признаки стоячей волны. Это искажение поля, как и изменение условий поглощения, в общем случае при измерениях не учитывается. Допускаемая при этом ошибка

относительно невелика, и, как правило, расчет опасности по *падающей* плотности мощности, или «интенсивности облучения» в отличие от «действующей интенсивности» [35], вполне допустим. Между тем, существование бегущей волны, характерной для свободного пространства или его достаточно хорошей модели, во многих реальных случаях просто невозможно из-за влияния предметов с высоким коэффициентом отражения: металлических поверхностей, стен домов и т. п. При этом бегущая волна фактически отсутствует; такое поле называют реактивным. Внесение в него органического тела приводит к обратному эффекту: появляется бегущая волна, направленная внутрь тела приблизительно перпендикулярно его поверхности. Степень поглощения телом электромагнитной энергии, как мы видели (п. 2.1.1), зависит от многих причин и при этом изменяется в широких пределах.

Наилучшим способом оценить радиоопасность в подобных условиях является регистрация раздельно электрической и магнитной составляющих поля. Впрочем, требование раздельного измерения можно несколько упростить. Действительно, *при установлении стоячей волны в ограниченном пространстве* с размерами много больше длины волны и с достаточно малым декрементом затухания, минимумы и максимумы электрической E и магнитной H составляющих связаны между собой через ρ:

$$\rho = E/H. \qquad (3.1.1)$$

Поэтому оказывается вполне достаточным измерять величину лишь одного из параметров: E или H.

Несколько по-иному обстоит дело *при близком контакте тела человека с первичными вибраторами или переизлучателями* электромагнитной энергии. Если в свободном пространстве электромагнитное поле является полем поперечной волны, то вблизи источников излучения появляется продольный компонент напряженности поля, между результирующими составляющими электрического и магнитного полей появляется фазовый сдвиг, а изменение модуля напряженности полей за счет увеличения (различного для электрического и магнитного поля) вклада «квазистационарных» компонентов, из-

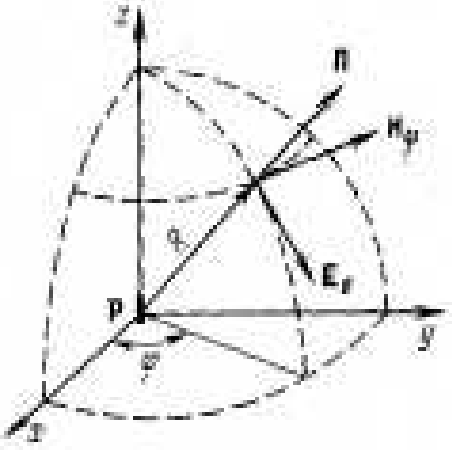


Рис. 3.1.1. Расположение векторов электрического и магнитного полей электрического диполя.

меняющихся как $1/R^2$ и $1/R^3$, резко возрастает по сравнению с изменением в волновой зоне. Для элементарного электрического диполя можно записать [146]

$$E_R = \frac{|\mathbf{p}|}{2\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{R^3} - \frac{jk}{R^2}\right)\cos\theta e^{-j\omega t}, \qquad (3.1.2)$$

$$E_\theta = \frac{|\mathbf{p}|}{2\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{R^3} - \frac{jk}{R^2} - \frac{k^2}{R}\right)\sin\theta e^{-j\omega t}, \qquad (3.1.3)$$

$$H_\varphi = -\frac{j\omega}{4\pi}|\mathbf{p}|\left(\frac{1}{R^2} - \frac{jk}{R}\right)\sin\theta e^{-j\omega t} \qquad (3.1.4)$$

(обозначения даны в соответствии с рис. 3.1.1; $\mathbf{p}$ — дипольный момент).

Фазовый сдвиг создает неудобства при измерениях, неизбежно приводя к занижению оценки опасности вблизи излучающих устройств, если особенности структуры поля в зоне индукции не учтены при обработке результатов измерений или соответствующей конструкцией измерительной антенны-зонда.

В настоящее время раздельное влияние электрической и магнитной составляющих электромагнитного поля в диапазоне СВЧ изучено крайне слабо, поэтому в качестве первого приближения имеет смысл искать общую для них характеристику поля — значение мгновенной (а не средней за период несущей) плотности потока мощности $\Pi_{ср}$, средней по сфере радиуса R, на котором находится абсорбирующий биообъект, т. е. поток энергии, определяемый совместно амплитудой напряженности активной и реактивной составляющих поля. Это удобно сделать введением комплексного вектора $\Pi_{п}$, который определяет полную амплитудную мощность, проходящую через единичную площадку в направлении положительной нормали к поверхности помещенного в поле абсорбирующего тела. Для дальнейшего полезно продолжить рассмотрение элементарного диполя *.

Комплексное значение $\Pi_{ср}$ электрического диполя определено в [146] путем интегрирования нормального

* Рассмотрение такого примера имеет здесь определенный смысл: например, основной источник внутренних излучений — щели в шкафах с генераторной аппаратурой, неплотности в фидерах и т. д. — целесообразно рассматривать как элементарные (магнитные) диполи (см. ниже).

компонента выражения для комплексного вектора Пойнтинга $\Pi_{\text{п}}$:

$$\Pi_{\text{п}} = \frac{\omega k^3}{32\pi^2 \varepsilon} \frac{\sin^2\vartheta}{R^2} |\mathbf{p}| \mathbf{i}_1 + \frac{j\omega}{32\pi^2 \varepsilon} \frac{5\sin^2\vartheta}{R^3} |\mathbf{p}|^2 \mathbf{i}_1 -$$

$$- \frac{j\omega}{16\pi^2 \varepsilon} \left(\frac{1}{R^3} - \frac{k^2}{R^2} \right) \sin\vartheta \cos\vartheta |\mathbf{p}|^2 \mathbf{i}_2 \qquad (3.1.5)$$

по поверхности сферы радиуса R:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} \Pi_{\text{п}} R^2 \sin\vartheta d\vartheta d\gamma = \frac{\omega^4}{12\pi} \mu \sqrt{\varepsilon\mu} |\mathbf{p}|^2 +$$

$$+ \frac{j\omega}{12\pi\varepsilon} \frac{|\mathbf{p}|^2}{R^3}. \qquad (3.1.6)$$

В выражении (3.1.5) $\mathbf{i}_1\mathbf{i}_2$ — единичные векторы сферической системы координат: $\mathbf{i}_1$ — по R, $\mathbf{i}_2$ — по ϑ. Действительная часть (3.1.6) дает *среднее* значение потока энергии, вытекающей через сферическую поверхность, т. е. определяет *радиационные потери* осциллирующего диполя. Они не зависят от радиуса сферы, но сильно зависят от частоты.

Мнимая часть выражения (3.1.6) зависит от $1/R^3$ и незначительно — от частоты. Именно эта составляющая поля диполя определяет в основном *мгновенную амплитуду* потока в поле индукции на очень малом расстоянии от диполя. Мнимая часть выражения (3.1.6) связана с энергией, которая одну половину периода вытекает из источника, а другую — возвращается обратно.

Нас интересует суммарная плотность потока мощности, воздействующей на биообъект, если он находится в зоне действия диполя на любом от него расстоянии R. В этом случае его величина может быть определена из выражения (3.1.6) так:

$$\Pi_{\text{сф}} = \frac{1}{4\pi R^2} \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{|\mathbf{p}|^2}{4\pi R^2} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{\omega^8}{12^2\pi^2} \mu^2 \varepsilon^2 + \frac{\omega^2}{(12\pi\varepsilon R^3)^2}} =$$

$$= \frac{1}{4\pi R^2} \frac{\omega |\mathbf{p}|^2}{12\pi\varepsilon} \sqrt{(\omega^2\mu\varepsilon)^2 + \frac{1}{R^6}}, \qquad (3.1.7)$$

где α и β — действительная и мнимая части выражения (3.1.6). Для свободного пространства $\varepsilon = \varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$.

$c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2}$, тогда

$$\Pi_{ср} = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{\omega |p|^2}{12\pi} \sqrt{k^6 + \frac{1}{R^6}} =$$

$$= \frac{1}{4\pi R^2} \frac{\omega |p|^2 (2\pi)^3}{12\pi\lambda^3} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{RK}\right)^6} =$$

$$= \frac{1}{4\pi R^2} \frac{(2\pi)^3 c |p|^2}{6\pi\lambda^3} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi R}\right)^6}. \qquad (3.1.8)$$

Именно эта плотность мощности осциллирующего электрического диполя будет воздействовать на биообъект, помещенный в его поле на расстоянии от него R (при выводе влиянием объекта на диполь пренебрегли).

Структура поля магнитного диполя совпадает со структурой поля электрического диполя, но векторы **E** и **H** поменялись местами. Вектор **H** теперь лежит в меридиональной плоскости, проходящей через диполь, и имеет радиальную и поперечную компоненты. Линии вектора **E** являются концентрическими окружностями вокруг оси диполя (как для электрического диполя — линии вектора **H**). Зная величину магнитного диполя, можно подсчитать и плотности мощности $\Pi_{ср}$. Однако на практике узнать величину дипольного момента обычно не удается. Поэтому есть смысл искать не абсолютное значение $\Pi_{ср}$, а отнесенное к величине радиационных потерь диполя. Эти потери измеряются обычным измерителем ППМ, а математически выражаются действительной частью формулы (3.1.6), деленной на площадь сферы $4\pi R^2$. Итак,

$$\Pi_{ср} \frac{4\pi R^2}{a} = \frac{c (2\pi)^3 12\pi}{6\pi\lambda^3 \omega^4 \mu \sqrt{\varepsilon\mu}} \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi R}\right)^6} =$$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi R}\right)^6} = J.$$

Величину J назовем коэффициентом реактивности. Численно он показывает, во сколько раз мгновенная комплексная плотность мощности всех составляющих поля элементарного диполя больше ППМ, измеренной на том же расстоянии.

Щель в непрозрачном экране (например, в кожухе шкафа с генераторной аппаратурой, в стенке волновода

и т. п.) можно представить как магнитный диполь, возбуждаемый с обратной стороны экрана падающим на него потоком мощности. При проверке качества такого экрана на расстоянии $R \geqslant \lambda$ интенсивность поля за ним может оказаться достаточно малой. Однако с уменьшением расстояния она будет быстро увеличиваться, приближаясь на очень малых расстояниях к интенсивности поля, падающего на тонкий экран с обратной стороны.

Случай единственной малой осциллирующей щели в свободном пространстве является явным упрощением; на практике чаще всего приходится иметь дело с паразитным излучением, проникающим через несколько щелей, расположенных на неодинаковом расстоянии друг от друга. В электрически ограниченном объеме создается сложная интерференционная картина, которая может характеризоваться в общем случае величинами максимальных значений E и H. Поэтому для правильной оценки влияния поля на биообъект необходимы измерители E и H.

Итак, E, H и $П$ полностью характеризуют поле как биогенный фактор. Вообще говоря, кроме известной зависимости (2.1.1), эти параметры могут быть связаны через объемную плотность энергии по формулам:

$$W_E = \frac{10^{-13}}{72\pi} E^2; \quad W_H = 2\pi 10^{-11} H^2; \quad W_П = 3{,}3 \cdot 10^{-11} П, \tag{3.1.9}$$

где $W_{E,H,П}$ в Дж/см²; E в В/м; H в А/м; $П$ в мВт/см² [68].

На практике, однако, эта характеристика поля (объемная плотность энергии) почти не используется. Редко применяются при оценке СВЧ полей и такие единицы, как вольты на метр и амперы на метр; даже измерители составляющих E и H в диапазоне СВЧ часто калибруются в единицах ППМ (т. е. в долях ватта на квадратный сантиметр).

Из-за пониженного (по отношению к свободному пространству) характеристического сопротивления среды в поле индукции величина абсорбируемой органическим материалом мощности возрастает. С другой стороны, вблизи неплотностей в экранах наблюдается удельное повышение мощности магнитной составляющей поля,

биологическая эффективность которого в диапазоне ВЧ считается менее выраженной. Конечный биологический эффект этих двух сторон взаимодействия поля индукции и органического тела пока еще не найден.

3.2. ФОРМЫ НОРМИРОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ

В § 3.1 сделана попытка определить и выбрать единицы измерения. Это только первый этап, позволяющий подойти к обоснованному учету амплитуды и структуры поля. Возможность учета времени также рассматривается ниже.

Большое разнообразие предложенных различными авторами [50, 74, 84, 101, 158] подходов к нормированию СВЧ излучений порождено не столько «качественным» различием поля, сколько усложнением пространственно-временных характеристик воздействия его на организм человека в производственных и лабораторных условиях (см. табл. 3.2.2). Именно поэтому вопросу нормирования нестационарного облучения уделяется сейчас большое внимание.

3.2.1. Способы нормирования прерывистых воздействий. Наиболее простым из способов является нормирование по *максимальной ППМ* или по *сумме ППМ* источников, если их несколько [35]. Оба они позволяют учесть влияние всех некогерентных источников, воздействующих на организм одновременно и постоянно. Для вращающихся антенн, однако, эти способы не адекватны: ведь обычно время воздействия поля при вращении, сканировании различно для разных антенн; даже для одной антенны на разных расстояниях скважность воздействия изменяется в пределах от половины до сотых долей. При оценке по первому методу разгрузка организма во время паузы, длящейся в 2 ... 100 раз дольше самого воздействия, не учитывается. Еще менее обоснован второй подход: расчет показывает, что вероятность скрещивания лучей 2—3-х антенн с обычными параметрами диаграмм обычно не превосходит 10^{-3} ... 10^{-4}; соответственно снижается и опасность воздействия излучений всех РЛС одновременно. Ошибка при таком подходе к нормированию поля излучателей с вращающимися антеннами, имеющими обычную ширину порядка единиц градусов, может дополнительно составить 10 ... 100 раз в сторону завышения опасности.

3.2.2. Интегральный (дозный) подход к оценке биологической эффективности поля. Несомненно, более гибким является интегральный (дозный) подход к оценке нестационарных излучений, который основывается на сравнении интеграла падающей плотности мощности (по определенному отрезку времени облучения), называемого обычно плотностью падающей дозы (ППД) или просто дозой *,

$$Д = \int_0^{T_н} П(t)\,dt \qquad (3.2.1)$$

с нормативной величиной дозы $Д_н$, установленной для этого же отрезка времени нормирования $T_н$ [22, 91, 92, 158, 182].

Дозный подход может быть предложен и в виде нормирования уровня *ППМ, среднего за время* $T_н$. Если это время меньше суток, то это, по сути, дискретная доза, мощность дозы **. Если нормируемое время равно суткам, то дозирование оказывается неразрывным по времени и мы имеем дело с дозой в реальном времени — назовем ее реал-дозой или просто дозой. Реал-доза позволяет определить суммарную степень облучения субъекта за продолжительное время: за сутки, месяц, год или за всю жизнь человека. Обычно она вводится вместе с ограничением по мощности дозы — ППМ, средней за какое-либо непродолжительное время, например за десятки или сотни секунд $M_н^{T_н}$;

$$M^{(T_н)} = \frac{1}{T_н}\int_0^{T_н} П(t)\,dt \geqslant M_н^{(T_н)}. \qquad (3.2.2)$$

Индекс $(T_н)$ при M означает, что нормируется, измеряется или рассчитывается мощность дозы (т. е. усредня-

* В гигиене встречается три понятия «дозы». Под дозиметрией иногда понимают всякое измерение в интересах техники безопасности; в радиационной гигиене под дозой понимают поглощенную часть падающей энергии (в диапазоне СВЧ величину относительно стабильную). В нашем случае понятие дозы введено выражением (3.2.1). В системе СИ ему соответствует понятие «поверхностная плотность энергии излучения».

** Полное название «мощность плотности падающей дозы». В системе СИ соответственно «мощность поверхностной плотности энергии излучения». По аналогии с дозой ее иногда называют мозой.

ется ППМ) за время $T_н$. Для краткости, а также когда имеется в виду вполне определенное значение $T_н$, либо когда оно для понимания текста не имеет значения, индекс $T_н$ или его конкретное числовое значение можно не ставить.

Исторически (табл. 3.2.1) этот подход возник как закономерное стремление связать с интенсивностью облучения другой равноправный параметр воздействующего поля — время облучения, как это уже сделано в радиометрии ионизирующих излучений, при воздействии химических факторов и т. д. [182]. В дальнейшем дозный подход оказался полезным и для оценки существенно нестационарных излучений и при расширении пределов использования существующих нормативов [74, 85].

Биофизической основой для разработки дозного подхода служат две известных группы явлений, наблюдаемых при взаимодействии организма человека с радиоизлучением.

1. Кумуляция эффекта воздействия в организме при длительном непрерывном и дробном воздействии, особенно в пределах дотепловых уровней, где зависимость этого эффекта от уровня поля оказывается наиболее линейной. Наличие кумулятивного эффекта отмечено в трудах ряда исследователей, в том числе З. В. Гордон [34], А. С. Пресмана [118], а также других ученых. Кумуляция говорит о типичной реакции тела с большой инерцией на импульсное воздействие.

2. Обратимость, адаптация, нормализация состояния организма, облучаемого короткими импульсами, наблюдается при больших паузах. Результаты многих биофизических экспериментов по изучению реакции организма на воздействие полей разных интенсивностей, приводимых с учетом второго действующего фактора — времени, при построении в координатах «доза — интенсивность» обнаруживают в широком диапазоне ППМ приблизительное постоянство величины дозы, необходимой для появления некоторого биологического эффекта (см., например, рис. 3.2.1 и табл. 3.2.2). Несомненно, на основании имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных, которые содержат оба регистрируемых параметра: ППМ и время, трудно говорить о линейности «интегрирования» при подобного рода процессах.

Иными словами, получаемая критическая доза облучения, соответствующая появлению определенной реак-

ции организма, далеко не всегда постоянна, так что очень часто искажения достигают двух-пятикратной величины и более (приведенные в табл. 3.2.2 результаты расчета плотности падающей дозы, полученные на основании данных Baranski (1964), отличаются от средней величины ППД (около 0,1 Вт·ч/см²) в десятки раз; этим аномалиям, если они в самом деле наблюдались, приходится только удивляться). Однако чрезвычайно высокое непостоянство биологических эффектов в реальных условиях воздействия СВЧ поля (из-за непостоянства ракурса освещения, частоты и т. п.; см. § 2.1 и 4.1) позволяет считать такую нелинейность «интегрирования» в общем допустимой, тем более, что нормативы, устанавливаемые, как правило, для очень малых интенсивностей, разрабатываются на основании результатов, полученных при оценке исключительно слабо выраженных эффектов, и потому эти нормативы, естественно, имеют значительную степень неопределенности и очень большой коэффициент запаса.

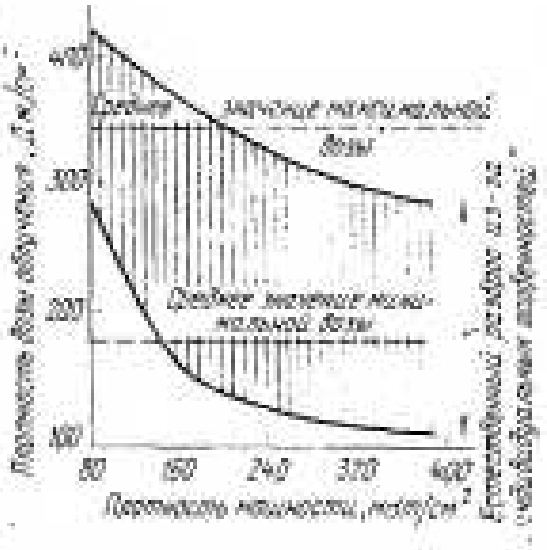


Рис. 3.2.1. Пороговое значение плотности дозы, необходимой для образования катаракты на глазах кролика (на основании данных, приведенных на рис. 2.1.2).

При разработке новой концепции—беспорогового риска заранее предполагается линейная зависимость доза—эффект; разного рода нелинейности нейтрализуются введением дополнительных коэффициентов запаса. Например, исследованиями, приведенными в работе [119а]*, в основном подтверждена эта зависимость при воздействии на организм крупных животных и человека СВЧ поля в диапазоне интенсивностей 1 .. 50 мВт/см², но одновременно выявлена и нелинейность, которая приводит к необходимости снижения допустимой дозы при верхней ППМ в 4 раза по сравнению с дозой на малых ин-

* Использован весьма «дорогой», но зато единственно верный способ количественной оценки облучаемости путем подбора ППМ или времени (или того и другого вместе), дающий определенный, *один и тот же* для всего цикла исследований биологический эффект. В качестве отправной точки взята доза 18 Дж/см².

Таблица 3.2.1

Отдельные этапы развития идей и аппаратуры дозиметрии

Год	Страна	Автор	Основа предложения	Количественные характеристики	Приборы
1956	США	Hirsh	Необходимо учитывать величину ($ПЖТ$)	—	—
1959	США	F. Leary	Дискрет-дозиметр	$T_и$=6 мин.	Измеритель мощности дозы („Дозиметр Ричардсона") на желатине
1963	СССР	А. Н. Ветчинкин и др. [22]	Реал-доза	—	Дозиметр на электромеханических накопителях
1965	США	Минн, Хеймер	Измеритель мощности дозы $M_и^{(29)}$	$T_и$=30с Дискретная доза 0,29 Дж/см² (суточная доза 864 Дж/см²)	Дозиметр на электрохимических элементах —
1966	СССР	Ф. Р. Холявко [158]	(Реал-доза $Д_и$)	$Д_и$=0,3 Дж/см²	—

Продолжение табл. 3.2.1

Год	Страна	Автор	Основа предложения	Количественные характеристики	Приборы
1966	США	Стандарт USAS C.95.1—1966	Дискрет-доза $M(^4)$+ +учет температурно-влажностных условий	$T_н$=6 мин. Дискретная доза 3,5 Дж/см² (суточная доза 864 Дж/см²) Для неблагоприятных условий снижается до 10 раз.	
1968	СССР	Е. А. Ермолаев Р. И. Ковач [50]	Математическая интерполяция существующих нормативов	—	—
1970	ЧССР	Нормативы	Суточная доза (реал-доза) $Д_н$	$T_н$=24 ч Профессионалы: непрерывное облучение 0,73 Дж/см², импульсное облучение—0,29 Дж/см² Население: непрерывное облучение 0,22 Дж/см²; импульсное облучение 0,087 Дж/см²	
1972	СССР	Б. М. Савин, А. Г. Суббота, Б. А. Чухловин и др. [131а]	Экспериментальное установление нелинейности биологического эффекта при $П$=1 . . . . . 50 мВт/см² (ниже 1 мВт/см² эффект оказывается незначительным)	$ПТ^{1,38}$=const	—

Таблица 3.2.2

Сравнительные условия гибели животных под действием ЭМП СВЧ (смертность 50...100%) [118]

Частота ЭМП, ГГц и режим облучения	Животное	Энергетические параметры облучения			Повышение температуры тела, °С	Литературный источник (автор и год выпуска по [118])
		интенсивность ЭМП, мВт/см²	время облучения, мин	плотность падающей дозы, Вт·ч/см²		
0,2	Собака	330	15	0,085	5	Addington at al., 1961
	Морская свинка	590	20	0,145	5,9	
	То же	410	20	0,102	4,2	Michaelson at al., 1961
	» »	330	20	0,083	4,1	
	Кролик	165	30	0,082	6...7	
2,8—3 (импульсный)	Собака	165	270	0,75	4...6	
	Кролик	300	25	0,12	6...7,5	
	То же	100	103	0,17	4...5	Тягин, 1958
	Крыса	300	15	0,075	8...10	
	То же	100	25	0,04	6...7	
	» »	40	90	0,06	—	Лобанова, 1960
	» »	400	13...14	0,096	7	Мирутенко, 1964
10 (импульсный)	Мышь	32	1,7	*0,0029*	5,6...7,8	Baranski at al., 1963
	То же	8,6	33	*0,0047*	9,2	
	» »	5	188	0,015	6,8	
24 (импульсный)	Крыса	300	20	0,1	5,5	Deichman at al., 1959
	То же	28	139	0,065	—	
	Мышь	170	6,3	0,018	—	
	То же	37	282	0,17	—	

тенсивностях, т. е. вместо дозной зависимости $Д = П \cdot t$ оказывается более точной $Д = П^{1,20} \cdot t$. Эта нелинейность может быть учтена введением заранее дополнительного коэффициента запаса, равного четырем, и последующего использования линейной дозиметрии либо применением средств нелинейной дозиметрии, учитывающей эту нелинейность автоматически. Разработка подобных приборов в настоящее время ведется.

Несмотря на относительную общность взглядов о необходимости и целесообразности интегрального подхода, у многих авторов [93, 158] имеются по крайней мере 3 группы разногласий, которые тормозят его повсеместное введение.

Первое — отсутствие единства взглядов на величину биологического эквивалента. Резкое различие величин биологического эквивалента зарубежных и отечественных нормативов по ППМ отражается и на величине дозного эквивалента. Например, уровень поля, взятый Минцем и Неймером за основу при обосновании их метода измерения дозы [101], определяется действующим нормативом ППМ 10 мВт/см², который, однако, в дозиметрии установлен допустимым *средним* за 30 секунд облучения уровнем, *безотносительно к величине пиковых ППМ*, действующих в течение этих 30 с. В таких условиях вместо ППМ измеряется фактически мощность дозы с временем усреднения, равным $T_н = 30$ с. Таким образом, нормативная величина мощности дозы оказывается равной $М_н = 0{,}08$ мВт·ч/см² за 30 с или $Д_н = 864$ Дж/см² за сутки. В соответствии с новым стандартом США (USAS C95.1.1966) величина $T_н$ возросла до 6 мин [118]. При этом суточная доза, естественно, не изменилась, но дискретная доза возросла до 0,96 мВт·ч/см², или 3,5 Дж/см².

Если при расчете $Д_н$ положить в основу принятые в нашей стране нормативы по ППМ (см. введение), значение $Д_н$ оказывается равным 0,08; 0,2 и 0,25 мВт·ч/см², или 0,29; 0,72 и 0,9 Дж/см² за сутки соответственно при облучении интенсивностями порядка 10, 100 и 1000 мкВт/см² *. Таким образом, в этом случае оказа-

* Работа же на крупных биообъектах, проведенная в Военно-медицинской академии им. С. М. Кирова, показывает обратное: при повышении интенсивности облучения количество допустимой падающей энергии «должно уменьшаться или по крайней мере быть неизменным, но ни в коем случае не нарастать, что допускается действующими нормативами» [119а].

лось возможным величину допустимой дозы принять порядка 0,3 Дж/см² [158], т. е. с запасом, равным приблизительно 2 по отношению к средней расчетной величине. Отсюда же следует: для круглосуточного нормирования облучения (это характерно для населения) допустимая ППМ стационарного облучения оказывается равной 3,3 мкВт/см². Для работников, занятых на производстве в течение рабочего дня (например, 8 ч) допустимая ППМ стационарного облучения оказывается равной 10 мкВт/см², возрастая с уменьшением времени воздействия (все это при использовании в качестве основы существующих нормативов).

Вторым неясным вопросом считается выбор нормируемого времени интегрирования, или максимально разрешенного времени усреднения ППМ — $T_н$. Сейчас известно несколько предложений, касающихся установления величины этого важного параметра (табл. 3.2.1).

1. $T_н = 30$ с — время усреднения первого американского дозиметра [101].

2. $T_н = 6$ мин — величина, установленная в качестве нормативной в США.

3. $T_н = 24$ ч — нормируемое время при выборе суточной дозы (или среднесуточной ППМ, что одно и то же).

4. Вся жизнь человека *.

Естественно, чем больше время $T_н$, тем больше ошибка «интегрирования» реакций воздействий СВЧ излучений в организме — гипотетическое свойство неэквивалентности восприятия организмом отдельных воздействий равной энергии, но разной величины ППМ.

Некоторые, весьма скудные данные о проявлении этого свойства организма сейчас имеются для очень высоких энергий малого времени воздействия — единицы минут (см. рис. 3.2.1, составленный на основании данных рис. 2.1.2, и рис. 3.2.2, изображающий две аналогичные зависимости ППМ от времени воздействия, полученные разными авторами в разное время [135]). Эти исследования сыграли, видимо, определенную роль при выборе времени усреднения в нормативах США (6 мин).

При усреднении за очень большое время увеличивается также предел пикового уровня ППМ *при одно-*

---

* Оценка дозы облучения, получаемой за всю жизнь, проведена совсем недавно Барнесом [170]. Он подсчитал, что за 50-летний рабочий период по ПДУ США человек получает: шума — $5 \cdot 10^{-4}$ кВт·ч, микроволнового облучения — $5 \cdot 10^{3}$ кВт·ч, радиации — $5 \cdot 10^{-5}$ кВт·ч.

кратном кратковременном воздействии, т. е. появляется опасность переоблучения высокими пиковыми уровнями, контроль над которыми, естественно, теряется при любом усреднении. Однако случаи однократного излучения с очень высокой ППМ на практике почти не встречаются. При оценке импульсных периодических сигналов пиковая ППМ приближается к пробойной лишь при очень высоких скважностях и очень высоких средних ППМ, на практике также встречающихся крайне редко. Поэтому

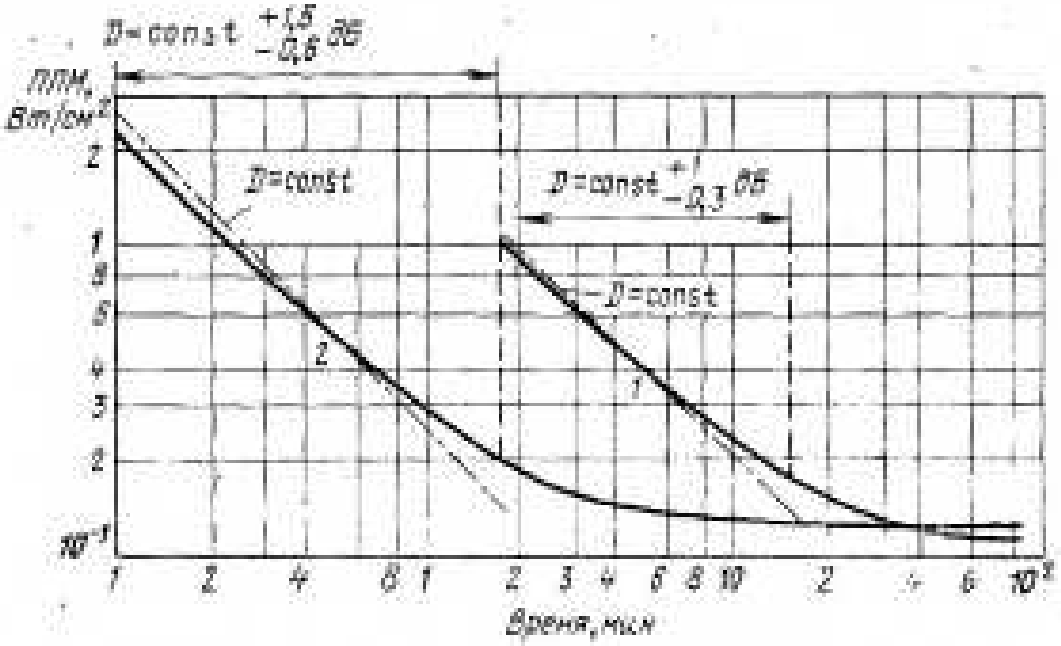


Рис. 3.2.2. Пороговые значения плотности потока мощности, при которых наблюдалось образование катаракты глаза, в зависимости от времени облучения.

1 — результаты работы Cerpenier R. L. и др., 1960; *2* — результаты работы Ely T. S. и др., 1964.

имеет смысл нормировать не пиковую ППМ, а энергию или мощность дозы, т. е. ППМ, среднюю за некоторое время, определяемое интеграционными свойствами биологических процессов в воспринимающем органе или организма в целом *. В качестве примера можно сослаться на подобные свойства глаза, определяющие критическую частоту мельканий воздействующих на него световых импульсов. Для многих факторов, в том числе и для радиоволновой энергии, когда нет специального органа, воспринимающего энергию воздействующего

* Эти интеграционные процессы определяют также характер реакции организма на резкие перепады интенсивности СВЧ поля.

фактора, интегрирующая способность различных органов и систем, к тому же в разной степени чувствительных к данному фактору, различна. Поэтому выбор времени $T_н$ относительно произволен. Судя по некоторым данным биофизического плана, время $T_н$ для нормирования мощности дозы не должно превышать десятков или сотен секунд. Как мы уже указывали, в США принятая величина $T_н = 6$ мин.

Третьим ограничением является отсутствие доказательств против предположения о существовании для живого организма так называемых критических частот повторения, для которых допустимый биологический эквивалент надо было бы снижать.

Сейчас неизвестны какие-либо универсальные предложения, аннулирующие все перечисленные факторы, которые препятствуют повсеместному внедрению дозного подхода в гигиеническую практику. Однако нетрудно видеть, что ни один из этих факторов не является принципиальным. Действительно, выбор биологического эквивалента фактически уже сделан каждой страной при разработке действующих нормативов и во многом определяется не столько биофизическими, сколько, увы, моральными причинами.

Важный параметр — предельно допустимая величина пиковой плотности мощности $П_{пик}$ — может быть легко определен через пробойную напряженность электрического поля $E_{пр}$ как

$$П_{пик}\ [Вт/см^2] = 1{,}25 \cdot 10^3 \cdot E^2_{пр}\ [кВ/см], \qquad (3.2.3)$$

т. е. пробойной величине пиковой напряженности $E_{пр} = 30$ кВ/см соответствует допустимая плотность мощности $П_{пик} = 1{,}1 \cdot 10^6$ Вт/см². При реальных значениях импульсной скважности $q_{имп} = 10^3$, скважности прерывания $\gamma_{имп} = 10^3$ величина средней плотности мощности соответственно такому пиковому уровню оказывается равной около 1 Вт/см², т. е. намного больше принятых сейчас ППМ (1 или 10 мВт/см²).

Расчет $П_{пик}$ можно проделать также через дозу. Даже при однократном высвечивании всей рассчитанной исходя из нормативов США суточной дозы 864 Дж/см² всего за одну секунду при $q = 10^5$ пиковая ППМ оказывается равной около 10^3 Вт/см², т. е. намного меньше пробойной величины. Для второго биоэквивалента — 8,9 Дж/см² в сутки — опасность еще менее реальна.

Для характеристики облучаемости с выраженной периодичностью (например, при периодическом обзоре пространства одной или несколькими РТС) достаточно воспользоваться средним за период облучения уровнем плотности мощности, или мощностью плотности падающей дозы (3.2.2).

Если период вращения (сканирования) станции $T_{ск} < T_н$, замена $T_н$ на $T_{ск}$ в выражении (3.2.2) не изменяет величину M. Для медленнопериодических и непериодических процессов расчет или измерение величины M следует проводить для каждого акта воздействия отдельно или периодически, с частотой $f \geqslant 1/T_н$.

Мощность дозы является относительно стабильной характеристикой каждой точки пространства в зоне действия РТС с периодически перемещающимися диаграммами и может быть измерена или рассчитана через ППМ ($П$) в время действия луча T_0 (за время T) или скважность воздействия γ (для каждой РТС):

$$M = \gamma П = П(T_0/T). \qquad (3.2.4)$$

Для стационарного воздействия $M = П$. Для нескольких источников $M = \Sigma M_i$. Возможность суперпозиции частных эффектов от воздействия нескольких источников с периодическим облучением путем сложения мощности падающей дозы каждого из них для получения суммарного эффекта является важным достоинством дозного метода нормирования. Нахождение в течение времени $T \gg T_н$ в точке поля, характеризуемой мощностью дозы M, определяет величину дозы как

$$Д = MT. \qquad (3.2.5)$$

Таким образом, основные параметры облучения для поля с постоянным уровнем оказываются связанными следующим выражением:

$$Д = \Sigma(П_i \gamma_i T_i) \leqslant Д_н; \qquad (3.2.6)$$

при этом за любой отрезок времени $T_н$ должно соблюдаться условие

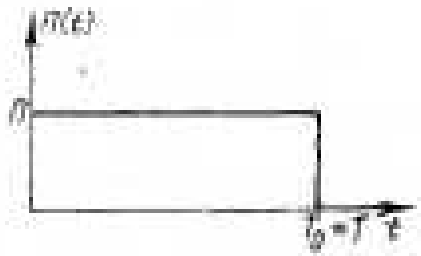
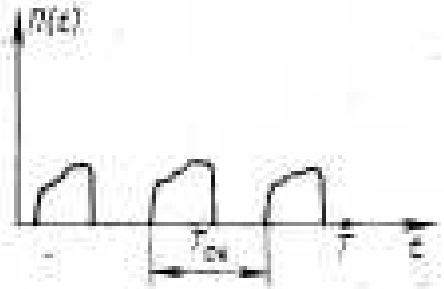
$$\frac{1}{T_н} \int_0^{T_н} П(t)\, dt = M^{(T_н)} \leqslant M_н^{(T_н)}. \qquad (3.2.7)$$

Итак, для оценки безопасности необходима проверка обоих условий: по дозе и по мощности дозы. Обзор существующих ситуаций облучаемости приведен в табл. 3.2.3 и 3.2.4, которые могут быть использованы на практике *в случае официального признания дозного подхода*.

Нормирование — это первый важный и довольно трудный шаг в осуществлении общей задачи оптимальной защиты человека от СВЧ излучений. *Первый* — потому,

Таблица 3.2.3

Варианты облучения полем СВЧ (T_0 — общее время облучения, включая паузы)

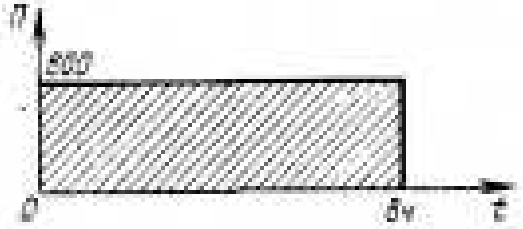
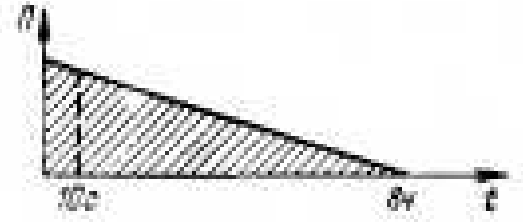
Вариант облучения (непрерывное или импульсное)		Временная форма поля	Пример источника	Оценка облучения дозами методом $Д$ и $Д_в$
Круглосуточно или ограниченно от одного или нескольких источников	Стационарное		Поле неподвижной антенны	$Д = ПT_0 = ПT$
	Периодическое прерывистое		Антенное поле РЛС с вращающейся диаграммой	$Д = TM^{(T_в)}$, где для обычного случая $T_{см} \ll T_в$ $M^{(T_в)} = \frac{1}{T_{см}} \int_0^{T_{см}} П(t)dt$

Продолжение табл. 3.2.3

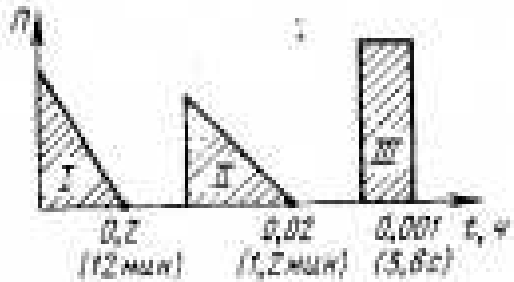
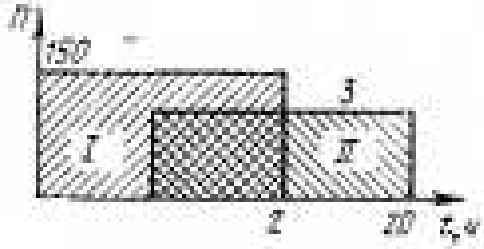
Вариант облучения (непрерывное или импульсное)		Временная форма поля	Пример источника	Оценка облучения дозами методом $Д$ и $Д_н$
Круглосуточная ограниченно от одного или нескольких источников	Эпизодическое		Антенное поле РЛС с программным обзором	$Д = \int_0^{T_н} П\,(t)\,dt$ $M(T_н) = \frac{1}{T_н}\int_0^{T_н} П\,(t)\,dt$
Однократное			Антенное поле РЛС сопровождения	$M(T_н) = \frac{1}{T_н}\int_0^{T_н} П\,(t)\,dt$

Таблица 3.2.4

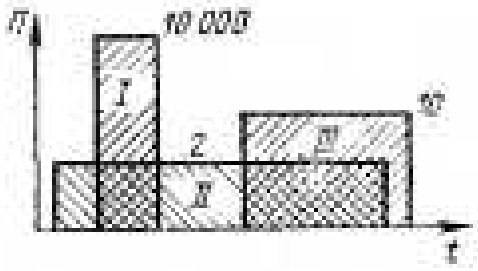
Примеры расчета коэффициента защиты $K_з$ на основании $Д_н = 240$ мкВт·ч см² и $M_н = 500$ мкВт/см² (кроме оговоренных случаев, ППМ [мкВт/см²], t и T [ч], $Д$ [мкВт·ч/см²])

Номер варианта	Изображение и объяснения	Изменяющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средний за 10 с	Расчет защиты по реал-дозе	Общий вывод по защите
		$П$	T		$M(10) = 500$ мкВт·ч/см²	$Д = 240$ мкВт·ч/см²	
1		600	8	$M = П = 600$	$600 > 500$, $K_з = \frac{600}{500} = 1{,}2$	$Д = 600 \cdot 8 = 4800 > 240$; $K_з = \frac{4800}{240} = 20$	$K_з = 20$ (13дБ)
2		1200	8	$M = П = 1200$	$1200 > 500$, $K_з = \frac{1200}{500} = 2{,}4$	$Д = \frac{1200}{2} \cdot 8 = 4800 > 24$, $K_з = \frac{4800}{240} = 20$	$K_з = 20$ (13дБ)

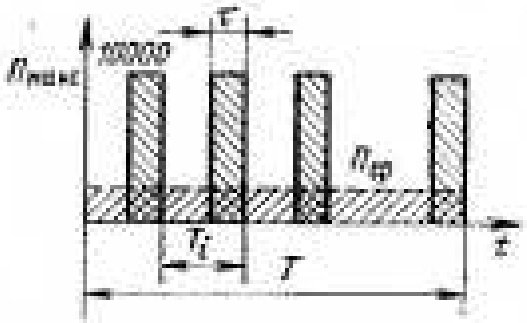
Продолжение табл. 3.2.4

Номер варианта	Изображение и объяснения	Имеющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средней за 10 с	Расчет защиты по реал-дозе	Общий вывод по защите
		$П$	$Т$		$M(10) \approx$ ≈500 мкВт·ч/см²	$Д$=240 мкВт·ч/см²	
3	 Один или несколько равных источников	200 150 2000	0,1 0,01 0,001 (3,6 с)	$M=П=200$ 150 $M=П=2000\frac{3,6}{10}=$ $=720$	200<500 150<500 720>500; $K_з=\frac{720}{500}=$ $=1,5$	$Д=\frac{200\cdot0,2}{2}+$ $+\frac{150\cdot0,02}{2}+$ $+2000\times0,001=$ $=20+1,5+2=$ $=23,5<240$	$K_з$=1,5 (1,7дБ)
4	 Два источника	150 3	2 20	$M=П=$ $=150$ $M=П=3$	150<500 3<500	$Д=150\cdot2+3\times$ $\times20=360>240$	$K_з$=1,5 (1,7дБ)

Продолжение табл. 3.2.4

Номер варианта	Изображение и объяснения	Имеющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средней за 10 с	Расчет защиты по дозе	Общий вывод по защите
		$П$	T		$M^{(10)}$ при $\dot{D}_{\text{ср}}=500$ мкВт·ч/см²	$D=240$ мкВт·ч/см²	
5	 Два или три источника	10 000	0,01 (36с)	$M=П=10\,000$	$10\,000>500$; $K_{\text{з}}=\frac{10\,000}{500}=20$	$D=10\,000\cdot 0{,}01+2\cdot 10+10\cdot 3=150<240$	$K_{\text{з}}=20$ (13дБ)
		2	10	$M=П=2$	$2<500$		
		10	3	$M=П=10$	$10<500$		
6	Сканирующий луч или импульсная ставщня ($T_{\text{и}}\ll 1$, поэтому $П_{\text{м}}$ измеряется ИП без остановки луча или ПО-1 при остановке луча; $П_{\text{ср}}$ измеряется ПО-1 при сканировании)						

Продолжение табл. 3.2.4

Номер варианта	Изображение и объяснения	Имеющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средней за 10 с	Расчет защиты по разовой дозе	Общий вывод по защите
		$П$	T		$M^{(10)}$ = =500 мкВт·ч/см²	$Д$=240 мкВт·ч/см²	
		$П_{макс}$= =10 000					
	Несколько вариантов, различающихся значениями q.						
	а) q=200	$П_{ср}$=50	10	$M=П_{ср}$= =50	50<500	$Д$=50·10= =500·240; $K_з=\frac{500}{240}\approx 2$	$K_з$=2 (3дБ)

Продолжение табл. 3.2.4

Номер варианта	Изображение и объяснения	Имеющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средний за 10 с	Расчет защиты по реал-дозе	Общий вывод по защите
		Π	τ		M[19] и $=500$ мкВт·ч/см²	$Д_{\text{доп}}=240$ мкВт·ч/см²	
	б) $q=10$	$\Pi_{\text{ср}}=1000$	0,1	$M=\Pi_{\text{ср}}=1000$	$1000>500$, $K_{\text{з}}=2$	$Д=1000\cdot0,1=100<240$	$K_{\text{з}}=2$ (3дБ)
	в) $q=10$	$\Pi_{\text{ср}}=1000$	10	$M=\Pi_{\text{ср}}=1000$	$1000>500$, $K_{\text{з}}=2$	$Д=1000\cdot10=10\,000>240$, $K_{\text{з}}=\frac{10\,000}{240}\approx40$	$K_{\text{з}}=40$ (16дБ)
7	Вращающаяся антенна или излучение с большими паузами (рис. п. 6) $T>1''$, поэтому: $\Pi_{\text{макс}}$ — измеряется ИП-3445 без остановки луча или ПО-1 с остановкой Примеры для $\tau=0,01''$:						
	а) $T=100''$; q[19]$=$	$\Pi_{\text{макс}}=100\,000$	20	$M=\frac{q^{[19]}}{10}\times\Pi_{\text{макс}}=100\,000\times\frac{0,01}{10}=100$	$100<500$	$Д=100\,000\frac{0,01}{100}\times20=200<240$	Защита не нужна

Продолжение табл. 3.2.4

Номер времени	Изображение в объяснении	Имеющиеся данные о ППМ и времени		Пересчет M	Расчет защиты по ППМ, средней за 10 с	Расчет защиты по разд-дозе	Общий вывод по защите
		Π	T		$M^{(10)}$ и ≈ 500 мкВт·ч/см²	$Д \approx 240$ мкВт·ч/см²	
	б) $T=2{,}5''$; $\tau^{(10)}=4$ т	$\Pi_{макс}=10\,000$	8	$M=\frac{\tau^{(10)}}{10}\times\Pi_{макс}=10\,000\times\frac{0{,}04}{10}=40$	$40<500$	$Д=40\cdot 8=320>240$; $K_з=\frac{320}{240}=1{,}3$	$K_з=1{,}3$ (1,2дБ)
	в) $T=10''$; $\tau^{(10)}=$т	$\Pi_{макс}=20\,000$	24	$M=\frac{\tau^{(10)}}{10}\times\Pi_{макс}=20\,000\times\frac{0{,}01}{10}=20$	$20<500$	$Д=20\cdot 24=480>240$; $K_з=\frac{480}{240}=2$	$K_з=2$ (3дБ)

Примечание. τ — длительность каждого воздействия при сканировании, вращении или излучении; $\tau^{(10)}$ — сумма длительностей импульсов за 10 с; $\Pi^{(10)}$ — ППМ, усредненная за период 10 с при $T<10$ с: $\Pi^{(10)}=\Pi_{макс}\frac{\tau^{(10)}}{10}$, при $T>10$ с $\Pi^{(10)}=\Pi_{макс}\frac{\tau}{T}$;

$Д_н=240$ мкВт·ч/см² — нормативная величина дозы, соответствующей среднесуточной ППМ: $10\frac{\text{мкВт}}{\text{см}^2}$; $\Pi_н^{(10)}=M_н=500$ мкВт/см² — нормативная величина ППМ, средней за 10 с; $K_з$ — коэффициент необходимой защиты.

СХЕМА ЭТАПОВ НОРМИРОВАНИЯ И УЧЕТА ОСНОВНЫХ ДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ ПОЛЯ СВЧ

Выбор критерия

(или критериев при многоуровневом нормировании)

↓

1. Нормирование энергетических параметров облучения

↓ Уровень — ↓ Время воздействия

ППМ Π	Составляющие поля E, H	Объемная плотность энергии $W_{E,H,\Pi}$	Общее время облучения $t_{общ}$	Скважность воздействия γ	Частота повторения F	Суммарное время воздействия $T_{общ} = \Sigma t_i$

Параметры по падающему или поглощенному полю

Нормирование включает следующие подэтапы:

— выбор необходимых и достаточных параметров;

— определение их единиц и величин;

— конструирование формы сочетания выбранных параметров, удобной для использования их на практике ($ППМ_{макс}$, $ППМ_{ср}$, M, $Д$ и т. д.)

2. Дополнительные факторы, требующие учета при нормировании (см. гл. 6):

— минимальное *геометрическое* расстояние от излучателя $R_{мин}$ (см) требует геометрически малого зонда;

— минимальное электрическое расстояние от излучателя: $R_{мин}/\lambda$ требует применения электромагнитного или магнитного зонда.

} Допустим перерасчет (через I)

3. Факторы «третьего» порядка, требующие, возможно, учета при нормировании:

— микрорезонансные эффекты (на молекулярном уровне);

— макрорезонансные эффекты (соотношение с длиной волны всего тела или отдельных его частей и органов);

— глубина проникновения в тело — также зависит от частоты.

что с него начинается обоснование всех работ по защите, *важный* — так как, пожалуй, ни один последующий этап проведения расчетных, измерительных работ и защитных мероприятий не может настолько повлиять, с одной стороны, на здоровье человека, а с другой — на экономичность всей системы защиты, как нормирова-

ние*. Нормирование СВЧ излучений — *трудный* этап проведения защиты, так как связан с очень большим разнообразием трудноучитываемых факторов (см. выше схему этапов нормирования), которым, пожалуй, не характеризуется ни один другой реагент. Пока в этом вопросе сделано очень мало, и то, что уже сделано, требует дальнейшего совершенствования. Это необходимо прежде всего для правильного применения результатов решения конкретных инженерных задач по обнаружению и количественному определению действующих параметров СВЧ поля, в частности ППМ и времени воздействия.

Расчетным методам определения ППМ, прогнозу СВЧ поля посвящены 4-я и 5-я главы книги.

4. МЕТОДЫ ПРОГНОЗА ОБЛУЧАЕМОСТИ

Реальные условия облучения СВЧ полем, даже без учета его временных характеристик, чрезвычайно разнообразны: с одной стороны, во время работы при отрицательных углах места антенн позиция станций может быть подвергнута облучению энергией основного лепестка, с другой стороны, при работе «в зенит», на человека будут действовать «дальние» боковые лепестки. В помещениях с генераторной аппаратурой и элементами фидерного тракта имеются внутренние (паразитные) излучения аппаратуры, создающие угрозу переоблучения непосредственно на рабочем месте. В ряде случаев внутренние поля возникают вследствие проникновения энергии СВЧ через стены, а также вследствие переизлучения энергии металлическими включениями, имеющимися в материале стен и крыши.

Как правило, определение возможных каналов просачивания СВЧ энергии и экранировка их для снижения интенсивности поля на рабочих местах до допустимого уровня должно проводиться еще на этапе проектирования, отладки и сдачи аппаратуры в эксплуатацию. При

---

* Поэтому (в частности) принятые нормативы приходится периодически пересматривать. Нередко это приходится делать принудительно, ибо приверженцев любых законов за каких-нибудь 3—5 лет их существования уже по чисто психологическим причинам всегда оказывается более чем достаточно. Естественно при этом, что наряду с вопросом, насколько правомерны новые предложения, следует считать законным и контрвопрос: в достаточной ли мере был обоснован старый подход?

эксплуатации необходим лишь регулярный контроль за сохранением безопасных уровней поля после проведения работ, связанных с разборкой или разрегулированием излучающей аппаратуры во время регламентных или настроечных работ, после смены ламп и т. п. Наибольшую и постоянную опасность представляют облучение основным лепестком и ближними (в пределах 20 ... 40° относительно электрической оси антенны) боковыми лепестками, и только в некоторых случаях опасность представляют поля «дальних» боковых лепестков, переливы энергии облучателя за зеркало и т. д.

4.1. КРАТКАЯ ОЦЕНКА МЕТОДОВ РАДИОПРОГНОЗА

Наиболее точные сведения об облучаемости территории в зоне действия уже функционирующих РЛС и, таким образом, о необходимости и нужной степени эффективности защиты от их вредного воздействия могут дать инструментальные методы определения ППМ. Однако при вводе новых станций, опасные зоны которых занимают очень большие площади — десятки и сотни квадратных километров — ряд задач защиты необходимо решать еще до ввода станций в строй.

Таким образом, необходимы эффективные методы расчета поля на основании общих параметров станции еще до построения действующего образца РТС, т. е. на этапе проектирования.

При оценке полей уже действующих РТС имеет смысл использовать расчетные методы в следующих случаях:

1) при ограниченном времени работы станции на излучение;

2) при небольшом объеме экспериментальных данных, не позволяющем представить полную картину облучаемости, тем более при всех допустимых режимах работы станции;

3) при невозможности полностью использовать имеющиеся экспериментальные данные из-за значительных изменений в конструкции РЛС.

В § 2.1 мы видели, что для оценки биологической опасности необходимы по крайней мере два параметра поля: интенсивность и время воздействия. Интенсивность поля в произвольной точке наблюдения зависит от целого ряда факторов и прежде всего от параметров

излучателя (антенны РТС, мощности излучения и длины волны), от степени влияния трассы, а также от распределения поля вблизи точки наблюдения, т. е. от местных предметов. Удобнее всего разделить эти факторы на две группы: первая — зависит от параметров излучателя и определяет интенсивность поля в точке свободного пространства, совпадающей геометрически с точкой наблюдения; вторая — от условий распространения на трассе и распределения вблизи земли, она учитывается с помощью поправочных коэффициентов к интенсивности поля в свободном пространстве.

Учет трассы и местных предметов с той точностью, которая необходима для радиопрогноза в целях биологической защиты, разработаны в достаточной степени и поэтому во многих случаях могут быть использованы в практике радиопрогноза в готовом виде. Следует иметь в виду, что при измерениях влияние отдельных параметров станции и трассы оказывается учтенным автоматически; между тем, учет влияния местных радиоотражающих предметов оказывается не столь очевидным. Дело в том, что, как правило, измерения полей проводятся в весьма ограниченном количестве точек, и поэтому глубоко нерегулярные интерференционные эффекты, возникающие вблизи нескольких или даже двух радиоотражающих поверхностей, зачастую не позволяют быть уверенными в точности общей оценки поля на основании нескольких измерений, проведенных в произвольных точках.

Расчетный путь определения энергетических параметров облучения в отличие от инструментального является более простым, но из-за сильного влияния многих различных трудноучитываемых факторов точность расчета в *каждой отдельной точке* оказывается сравнительно невысокой. И все же возможность получения значительного объема информации при расчете позволяет более полно представить всю картину облучаемости. В необходимых случаях (до включения станции на излучение и при отсутствии результатов измерений) расчетные методы могут служить основанием для разработки предварительных мер защиты, организации режима, труда, планирования работы служб контроля и т. п. *Расчетные методы являются первой фазой системы последовательного контроля радиобезопасности* (СПКР), которая (проведенная в полном объеме) состоит из четырех эта-

пов: 1) расчет поля в свободном пространстве (обычно проводится задолго до выбора места расположения станции на местности *); 2) учет условий распространения поля на конкретной местности; 3) уточнение данных учета местности путем измерения поля на местности чувствительными приемниками при работе построенной антенны от маломощного генератора; 4) измерение ППМ в реальных условиях при номинальной мощности передатчика.

Достаточно строгие методы расчета уровня поля — апертурный и токовый — позволяют с большой точностью оценить уровень поля, если точно заданы исходные данные. Однако создать на их основе простые инженерные методики практически невозможно из-за следующих недостатков этих методов:

— значительного количества исходных данных, необходимых для расчета,

— сложности математического аппарата,

— низкой *реальной* точности расчета вследствие трудности в естественных условиях удовлетворить требования, предъявленные к точности всех задаваемых исходных данных.

Некоторым исключением из общего правила является сейчас интенсивно разрабатываемая «физическая теория дифракции», однако далеко не всегда результаты, получаемые на основании этой теории, находят применение в практике радиопрогноза по крайней мере из-за трудности представления результатов в форме, удобной для использования. Таким образом, оказалось необходимым искать новые принципы, пригодные для создания обобщенной инженерной методики расчета поля.

Одним из них явился так называемый «ретроспективный принцип», который заключается в использовании для расчета всей картины поля данных о диаграмме направленности в дальней зоне, как известно, достаточно точно рассчитываемой на основании известных общих параметров антенны и некоторых выявленных общих принципов формирования поля, позволяющих достаточно просто определить значение интенсивности поля вблизи антенны.

---

* Известные попытки разработки методов расчета внутреннего поля паразитных излучений, проникающих через неплотности в экранах шкафов с СВЧ аппаратурой, фидеров и т. п., пока оказывались безуспешными.

При разработке нового метода расчета, названного **ретроспективным (Р-метод)**, было использовано несколько предпосылок. *Основной из них является допущение о достаточности расчета поля по огибающим максимумов* осевого поля и боковых лепестков, т. е. исключая расчет поля между максимумами поля; правомочность расчета по огибающим можно объяснить тем, что для определения биологической вредности имеет смысл учитывать только худший случай из возможных (в практических пределах стабильности заданной ситуации). Дело в том, что минимумы диаграммы поля, тем более в дальней зоне, как правило, относительно узки и нерегулярны (из-за влияния различного рода дестабилизирующих факторов: температурных деформаций антенного полотна и т. п.), поэтому при воздействии на реальную антенну ветровых, температурных нагрузок, уровень поля в точке, находящейся вблизи минимума диаграммы, является величиной существенно нестабильной. Тем более нецелесообразно рассчитывать на минимумы поля при определении опасности в зоне действия полей антенн с перемещающимися диаграммами. Наконец, такая постановка задачи объективно оправдана при расчете поля на относительно малых расстояниях от антенн, где действительно появляется явно выраженная полоса размытия между максимумами.

Вторым важным допущением является общее смягчение требований к точности расчета, которое оправдывается рядом объективных факторов биологического и физического характера, также позволяющих существенно упростить задачу разработки метода расчета (см. также п. 2.1.1):

1. Значительная количественная и качественная неоднородность распределения реальных СВЧ полей в пределах единиц или даже долей единиц размера человеческого тела, особенно при облучении внутренним и боковым антенным полем.

2. Малая вероятность относительно длительной неподвижности поля и биообъекта; резкая зависимость эффективности облучения от ракурса освещения (в сантиметровом и дециметровом диапазонах).

3. Большая зависимость эффективности облучения от физиологического состояния организма, состояния поверхности тела и его диэлектрических свойств.

4. Невозможность дифференцировать биоэффекты при малых (порядка единиц децибел) различиях в интенсивностях облучения; предельно допустимые нормы облучаемости в СССР, кстати, в настоящее время установлены с дискретностью 10 дБ.

Кроме того, эффективность воздействия поля сильно зависит от времени и характера облучения (имеются в виду прерывистое, непрерывистое, эпизодическое воздействия).

Все это и позволило считать удовлетворительной величину погрешности расчета огибающей диаграммы направленности поля в основном лепестке 2 ... 3 дБ, в боковых направлениях — порядка 4 ... 6 дБ.

Ретроспективный метод обеспечивает такую точность. При этом он позволяет в значительной степени упростить расчет интенсивности, сделать его наглядным и удобным в инженерном отношении, упростить процесс пользования расчетными данными, подойти к разработке инженерных методов расчета времени и скважности

воздействия. Именно при использовании Р-метода удалось разработать и внедрить оптимальную форму обобщения результатов расчета в виде специальных графиков, названных нами вертикальной и горизонтальной диаграммами излучения (ВДИ и ГДИ).

Наиболее типичными оказываются случаи, когда расчетная точка находится ниже или выше, а не сбоку излучателя. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться методы построения и правила использования только вертикальных диаграмм излучения. ВДИ представляет собой семейство линий равных ППМ, нанесенных в координатах расстояние — высота. Такое представление расчетных данных, как мы увидим ниже (§ 5.1), позволяет до минимума упростить их использование в практике радиопрогноза и защиты. Отметим также, что нет принципиальной разницы ни в построении, ни в использовании вертикальной и горизонтальной диаграмм излучения, а для антенн с осевой симметрией они вообще полностью совпадают, поэтому ниже речь будет идти только о ВДИ.

Р-методом можно пользоваться в большинстве практических случаев. Иногда требуется привлечение более строгих методов, некоторые примеры использования этих методов в практике радиопрогноза будут даны ниже.

Таким образом, интенсивность поля как его основной параметр может быть найдена расчетным и инструментальным путем. *Время* облучения для эпизодических и *скважность* для периодических воздействий пока могут быть определены только расчетным путем, т. е. методами радиопрогноза, хотя использование результатов такого расчета может быть допустимо совместно с данными измерения интенсивности. И только при измерении поля измерителями дозы (дозиметрами) и мощности дозы * скважность и время облучения оказываются учтенными автоматически.

4.2. ОСНОВЫ «ТРАДИЦИОННЫХ» МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОЛЯ

Из всего разнообразия типов антенн СВЧ мы ограничимся здесь рассмотрением лишь зеркальных антенн, которые широко применяются в технике. Для расчета поля зеркальных антенн наибольшее распространение

* В некоторых ведомствах их называют мощиметрами.

получили токовый и апертурный методы. Расчет дальнего бокового излучения обычно производится методом «краевых волн». Систематическое изложение этих методов можно найти в соответствующей литературе [см., например, 4, 66, 156], поэтому ниже приводится лишь их краткая характеристика, а основное внимание обращено на области их применения и ознакомление с результатами расчетов, которые могут оказаться полезными на практике при оценке интенсивности облучающего поля.

4.2.1. Общие принципы методов анализа поля антенн. Строгий анализ электромагнитного поля антенны неизбежно связан с решением уравнений Максвелла. Решения уравнений Максвелла для ряда отдельных условий размещения источников поля лежат в основе приближенных методов анализа, которые в преобладающем большинстве случаев обеспечивают достаточную для практики точность. Отличие приближенных методов друг от друга обусловлено различиями в допущениях и ограничениях, принятых при расчете и связанных с невозможностью учесть распределение элементарных источников поля по апертуре.

Уже сама конструкция зеркальной антенны (наличие облучателя и отражателя) и механизм излучения предполагают расчет поля в два приема, которые в теории антенн называются соответственно внутренней и внешней задачами. Внешняя задача заключается в расчете искомого поля по известному распределению источников на некоторой поверхности, ограничивающей антенну, внутренняя — в отыскании распределения источников поля (как результат действия облучателя) внутри некоторого объема, ограничивающего антенну, или на ее поверхности.

Один из распространенных методов решения внешней задачи заключается в расчете поля излучения антенны по известному распределению токов на освещенной поверхности зеркала и носит название **токового** метода. Хотя в самой основе токового метода лежат строгие решения уравнений Максвелла для случая распределения токов на замкнутой поверхности, сам метод является приближенным. Приближенность метода определяется главным образом тем, что решение внутренней задачи, т. е. отыскание распределения токов на поверхности зеркала, производится методом геометрической оптики при

следующих допущениях: а) облучатель считается точечным; б) отражатель считается расположенным в дальней зоне облучателя; в) плотность поверхностного тока в любой точке освещенной поверхности зеркала равна току, возбуждаемому на идеально проводящей плоскости; г) на обратной (теневой) стороне зеркала и вспомогательных элементах конструкции (тяги и др.) токи не возбуждаются. Рабочие формулы для расчета поля токовым методом могут быть получены лишь для конкретной конструкции антенны. Хорошие примеры практического применения токового метода для расчета дальнего поля зеркальных антенн содержатся в [102, 150].

Другой метод расчета называется **апертурным** и заключается в использовании информации о распределении поля в апертуре антенны. Этот метод достаточно прост и нагляден. При расчете поля апертурным методом можно абстрагироваться от реальной конструкции зеркала и решать задачу для определенного типа функций, с помощью которых аппроксимируются реальные амплитудные распределения поля по апертуре.

Исходным при расчете поля апертурным методом является выражение [4]:

$$U_{т\,п} = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(U_S \frac{\partial \psi}{\partial n} - \psi \frac{\partial U_S}{\partial n} \right) dS, \qquad (4.2.1)$$

где индекс S при U указывает на значение функции в плоскости апертуры антенны; n — единичный вектор нормали к апертуре в точке интегрирования.

Формула (4.2.1) известна в оптической теории дифракции под названием скалярного интеграла Кирхгофа. Анализ поля зеркальной антенны апертурным методом представляет по существу дифракционную задачу, т. е. задачу определения поля, создаваемого отверстием в непрозрачном экране при падении на него электромагнитной волны. Методы решения подобной задачи достаточно хорошо разработаны в теории оптики.

Внутренняя задача (отыскание распределения поля по апертуре) решается так же, как и при токовом методе, т. е. в геометро-оптическом приближении. Вводя понятие функции амплитудно-фазового распределения поля по апертуре, выражение (4.2.1) можно преобразовать

к виду [4].

$$U_{т\,п}=\frac{U_{макс}}{4\pi}\int\limits_S f(S)\frac{e^{-jkr}}{r}\left[\left(jk+\frac{1}{r}\right)\cos(\mathbf{n},\ \mathbf{r})+\right.$$

$$\left.+jk\mathbf{n}\mathbf{s}\right]dS, \qquad (4.2.2)$$

где $U_{макс}$ — максимальное значение U_S; $\mathbf{r}$ — единичный вектор в направлении r; $\mathbf{s}$ — единичная векторная нормаль к волновому фронту в апертуре. В зависимости от специфики решаемой задачи выражение (4.2.2) можно упростить, введя дополнительные ограничения.

Типичным для большинства практических приложений рассмотренных методов является допущение, что расстояние от антенны до точки наблюдения достаточно

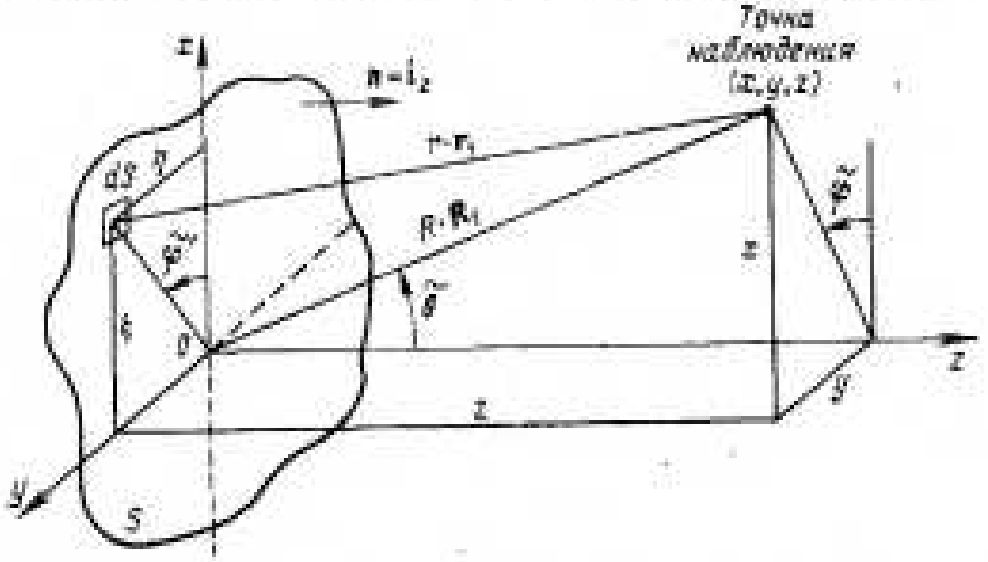


Рис. 4.2.1. Система координат, используемая при выводе формул апертурным методом.

велико и превышает по крайней мере несколько линейных размеров антенны. Если ограничиться также областью малых углов, то выражение (4.2.2) для синфазных раскрывов существенно упрощается и в системе координат, показанной на рис. 4.2.1, принимает вид [4]

$$U_{т\,п}=\frac{jU_{макс}}{\lambda R}\int\limits_S f_a(S)\,e^{-jkr}\,dS, \qquad (4.2.3)$$

где $R=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$ — расстояние от начала координат до точки наблюдения.

Наиболее критичны приближения для r в экспоненциальном (фазовом) члене подынтегрального выраже-

ния. Если точное значение

$$r = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + z^2} \qquad (4.2.4)$$

разложить в ряд и использовать члены разложения не выше первого порядка, то получается выражение, справедливое для поля в дальней зоне. Приближение для r, получаемое отбрасыванием членов разложения выше второго порядка, называется приближением Френеля, а значения r, где существенны квадратичные члены, — зоной Френеля. Таким образом, в зоне Френеля получаем

$$U_{\text{т п}} = \frac{jU_{\text{макс}} e^{-jkR}}{\lambda R} \int_S f_{\text{п}}(S) \exp^{jk\left(\frac{x\xi + y\eta}{R} - \frac{\xi^2+\eta^2}{2R}\right)} dS. \qquad (4.2.5)$$

Мы уже говорили, что для большинства практических задач интерес представляет не сама интерференционная структура бокового излучения, а его верхняя огибающая. Этот факт позволяет использовать для расчета бокового излучения **метод «краевых волн»** [66]. Сущность его заключается в том, что боковое излучение (за исключением ближайших к главному боковых лепестков и краевого лепестка, создаваемого прямым излучением облучателя) представляется в виде суперпозиции краевых волн от противоположных кромок зеркала и их многократных отражений от поверхности зеркала, причем общий вклад многократных отражений принимается равным $1/\sqrt{3}$ вклада однократно отраженной волны.

На практике при расчете плотность мощности удобно представить в виде функции таких характеристик антенны, как коэффициент направленного действия и диаграмма излучения. Поэтому исходное выражение для расчета интенсивности облучающего поля можно представить в виде функции

$$\Pi_{\text{т п}} = \Pi_0(R) |F(R, \tilde{\theta}, \tilde{\varphi})|^2, \qquad (4.2.6)$$

приняв

$$\Pi_0(R) = P_{\text{изл}} D(R) / 4\pi R^2. \qquad (4.2.7)$$

Здесь R, $\tilde{\theta}$, $\tilde{\varphi}$ — сферические координаты точки наблюдения с началом координат в центре раскрыва (рис. 4.2.1).

Выражение (4.2.6) напоминает хорошо известную формулу для плотности потока мощности в дальней зоне антенны (1.2.2). Отличие заключается в том, что обычно коэффициент усиления и диаграмма направленности

определяются при $\bar{R}\to\infty$, в то время как в (4.2.6) эти характеристики представлены в виде функций расстояния.

4.2.2. Дальнее поле синфазных апертур. Дальнее поле синфазных апертур является наиболее исследованным. Как правило, определение характеристик дальнего поля проводят для двух практически важных типов апертур: прямоугольной и круглой. Не отступая от этой традиции, рассмотрим характеристики **прямоугольной апертуры**, предварительно задавшись функцией амплитудного распределения поля в раскрыве.

Наибольший практический интерес представляет функция типа «косинус в $\tilde{n}$-й степени на пьедестале»:

$$f_a(\xi)=\tilde{a}+(1-\tilde{a})\cos^{\tilde{n}}(\pi\xi/L), \qquad (4.2.8)$$

где $-L/2\leqslant\xi\leqslant L/2\,(L=2a,\,2b)$, $0\leqslant\tilde{a}\leqslant 1$; $\tilde{n}=0,\ 1,2,\ldots$

Эта функция выбором параметров $\tilde{n}$ и $\tilde{a}$, характеризующих соответственно степень спада поля к краю апертуры и относительный уровень поля на краю апертуры, позволяет с достаточной степенью точности аппроксимировать реальные амплитудные распределения (в том числе и так называемые тейлоровские), создаваемые рупорными облучателями в раскрывах зеркальных антенн. Практическое значение в (4.2.8) имеют лишь несколько первых значений $\tilde{n}$. Случаи $\tilde{n}=0$ и $\tilde{a}=1$ соответствует равномерному амплитудному распределению.

Если прямоугольная апертура линейно-поляризованная и синфазная, а функция амплитудного распределения поля по апертуре является разделяющейся (т. е. может быть представлена в виде произведения функций распределения вдоль каждой из сторон апертуры), то КНД такой апертуры в дальней зоне определяется формулой [156]

$$D_\infty=(4\pi S/\lambda^2)\,k_{\text{исп}}, \qquad (4.2.9)$$

где D_∞ — КНД в дальней зоне, $k_{\text{исп}}=k_a k_b$ — коэффициент использования площади апертуры (рис. 4.2.2)

$$k_{a,b}=\left|\int_{-1}^{1} f(\xi')\,d\xi'\right|^2\Big/\,2\int_{-1}^{1}|f(\xi')|^2\,d\xi',$$

здесь $f(\xi')$ — функция амплитудного распределения вдоль соответствующих сторон апертуры; $\xi'=2\xi/L$.

Таблица 4.2.1

Расчетные значения коэффициентов $k_{a\,(b)}$ и уровня первого бокового лепестка δ_1 для функции распределения (4.2.8)

$\bar{n}$	$\tilde{a}$						
	1,0	0,447	0,316	0,178	0,1	0,0562	0
	$k_{a\,(b)}$						
1	1,0	0,955	0,927	0,876	0,855	0,838	0,812
2	1,0	0,932	0,881	0,796	0,750	0,714	0,667
3	1,0	0,92	0,859	0,750	0,684	0,640	0,577
	δ_1, дБ						
1	13,2	18,3	20,1	22	22,8	23	23,1
2	13,2	23,2	26,3	33,3	46,1	38,9	31,4
3	13,2	21,5	23,1	30,1	34,1	37,9	39,3

В табл. 4.2.1 приведены расчетные значения k_a и k_b для $\bar{n}=1$, 2, 3 и $\tilde{a}=0{,}1$; 0,447 (—7 дБ); 0,316 (—10 дБ); 0,178 (—15 дБ); 0,1 (—20 дБ); 0,0562 (—25 дБ) и 0. Отмеченные значения $\bar{n}$ и $\tilde{a}$ и в дальнейшем будут использоваться нами как наиболее характерные.

Таким образом, зная параметры $\bar{n}$ и $\tilde{a}$ функции амплитудного распределения поля вдоль каждой из сторон апертуры, можно по формуле (4.2.9) определить КНД антенны в дальней зоне. При изменении уровня освещения краев апертуры кроме изменения КНД изменяется и уровень бокового поля и, в частности, уровень первого бокового лепестка (табл. 4.2.1).

Диаграмма направленности, т. е. зависимость поля излучения от углов $\bar{\theta}$ и $\bar{\varphi}$, обычно определяется не в самом общем виде (пространственная диаграмма), а для характерных («главных») плоскостей, какими являются плоскость $\bar{\theta}$, или xoz ($\bar{\varphi}=0$), и $\bar{\varphi}$, или yoz ($\bar{\varphi}=90°$) (рис. 4.2.1 и 4.2.2). В связи с этим задача расчета диаграммы направленности в каждой из этих плоскостей сводится к двумерной, т. е. к расчету в этой плоскости диаграммы направленности линейного излучателя длиной, равной размеру соответствующей стороны апертуры с соответст-

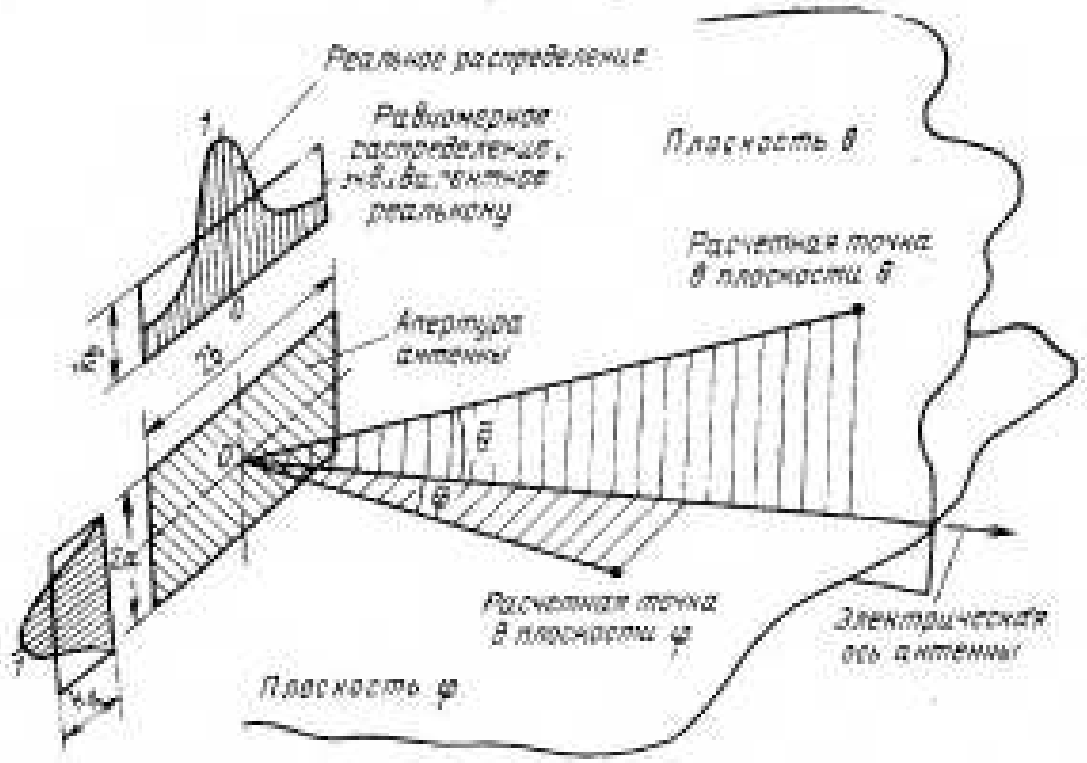


Рис. 4.2.2. Система координат, используемая в практических расчетах:

Вершина углов $\bar{\theta}$ и $\bar{\varphi}$ находятся в физическом центре апертуры. Коэффициенты $\bar{k}$ определяются раздельно для каждой плоскости (θ и φ).

вующим распределением поля. На рис. 4.2.6—4.2.11 штрих-пунктирной линией показаны диаграммы направленности для $\bar{n}=1{,}2$ и $\bar{\alpha}=0{,}316$; 0,1; 0.

При расчете характеристик поля *круглой апертуры* полагают, что амплитудное распределение поля симметрично относительно центра апертуры. В связи с этим интегрирование удобней выполнять в полярных координатах, а для аппроксимации амплитудного распределения использовать другой тип функции, а именно:

$$f_a(\rho)=\bar{\alpha}+(1-\bar{\alpha})\left[1-\left(\frac{\rho}{L/2}\right)^2\right]^{\bar{n}}, \qquad (4.2.10)$$

где L — диаметр апертуры (ниже принято обозначать для круглой апертуры $L=2a$); $0\leqslant\rho\leqslant L/2$, $0\leqslant\bar{\alpha}\leqslant 1$, $\bar{n}=0, 1, 2, \ldots$ В этих условиях КНД апертуры рассчитывается по формуле (4.2.9), а коэффициент использования может быть определен из табл. 4.2.2. Там же приведены значения уровня первого бокового лепестка диаграммы направленности.

Диаграмма направленности круглой апертуры в силу круговой симметрии амплитудного распределения обла-

Таблица 4.2.2

Расчетные значения $k_{\text{вси}}$ круглой апертуры и уровня δ_1 для функции распределения (4.2.10)

$\bar{n}$	$\bar{a}$						
	1,0	0,447	0,316	0,178	0,1	0,0502	0
	$k_{\text{вси}}$						
1	1,0	0,953	0,917	0,85	0,817	0,789	0,751
2	1,0	0,936	0,876	0,772	0,689	0,634	0,555
3	1,0	0,933	0,863	0,73	0,619	0,544	0,437
	δ_1, дБ						
1	17,6	21,1	22,3	23,7	24,3	24,4	24,5
2	17,6	23,5	27,0	32,6	34,9	33,9	30,4
3	17,6	25,1	32,2	33,0	38,2	33,7	35,9

дает симметрией относительно электрической оси. На рис. 4.2.12—4.2.17 штрих-пунктиром показаны диаграммы направленности для $\bar{n}=1{,}2$ и $\bar{a}=0{,}316$; 0,1; 0.

Для расчета огибающих *дальних боковых лепестков* можно воспользоваться результатами [66], где приведены огибающие бокового излучения цилиндрического и осесимметричного зеркал для $\psi_{\text{кр}}=30°$; 60°; 90°, нормированные к максимуму главного лепестка диаграммы направленности. При пользовании графиками [66] надо иметь в виду, что они относятся к случаю $\bar{a}>0{,}2\ldots0{,}3$ и дают значение огибающей максимумов нормированной диаграммы направленности по напряженности поля (а не по мощности).

До сих пор понятие дальней зоны употреблялось только в качественном смысле, так как не было необходимости в установлении специального критерия. Теперь, после того как приведены выражения для характеристик дальнего поля зеркальной антенны, есть возможность определить область их применения.

Как правило, ближняя граница дальней зоны по осевому полю ($R_{\text{д}}$) определяется по наибольшему размеру апертуры антенны:

$$R_{\text{д}}=2L^2_{\text{макс}}/\lambda, \qquad (4.2.11)$$

где $L_{\text{макс}}$ — максимальный линейный размер апертуры. Очень часто $L_{\text{макс}}=2b$ и тогда $R_{\text{д}}=R_{\text{дб}}=8b^2/\lambda$.

В области краевого дифракционного излучения из-за особенностей его механизма формирования границу дальнего поля с дос-

точной для практики степенью точности вне области основного излучения зеркальной антенны можно полагать равной

$$R_д \approx (12 \ldots 13)L, \qquad (4.2.12)$$

где L равно $2a$ или $2b$. Из (4.2.12) видно, что в этом случае $R_д$ не зависит от длины волны.

4.2.3. Ближнее поле синфазных апертур. В отличие от дальней зоны, в ближней зоне коэффициент усиления и диаграмма излучения синфазной апертуры являются функциями расстояния. Выражение для КНД прямоугольной синфазной апертуры в зоне Френеля для функции типа (4.2.8) имеет вид [70]

$$D(R) = D_\infty B_\vartheta B_\varphi. \qquad (4.2.13)$$

Расчет коэффициентов $B_\vartheta = B_\varphi$ ввиду громоздкости расчетных формул довольно сложен, поэтому на практике удобно пользоваться графиками зависимостей B от x, рассчитанными для $\tilde{n}=1, 2, 3$ [70]. Для КНД круглой синфазной апертуры по аналогии с (4.2.13) получается выражение

$$D(R) = D_\infty B^2, \qquad (4.2.14)$$

где B — коэффициент, зависящий от расстояния x и определяемый параметрами (4.2.10) в соответствии с рис. 4.2.3. Зависимости $B(x)$ для круглых апертур приведены на рис. 4.2.3—4.2.5 ($D=L$ — диаметр).

Для диаграмм излучения по мощности прямоугольной апертуры в каждой из двух взаимно перпендикулярных плоскостей (ϑ и φ) получается следующее выражение (нормировочный коэффициент опущен):

$$|F(x, u)|^2 = |\tilde{\alpha} F_0(x, u) + (1 - \tilde{\alpha}) F_1(x, u)|^2, \qquad (4.2.15)$$

где

$$F_n(x, u) = \frac{\sqrt{x}}{2^n} \sum_{i=0}^{N} \beta_i \exp\left[j \frac{\pi x}{2} \left(\tilde{n} - 2i - \frac{2u}{\pi} \right)^2 \right] [c(v'_i) - c(v_i) - js(v'_i) + js(v_i)],$$

$$F_0(x, u) = \sqrt{x} \exp\left(j \frac{2xu^2}{\pi} \right) [c(v'_0) + c(v_0) - js(v'_0) - js(v_0)],$$

$$v'_0 = \frac{1}{2\sqrt{x}} - \frac{2u\sqrt{x}}{\pi}, \quad v_0 = \frac{1}{2\sqrt{x}} + \frac{2u\sqrt{x}}{\pi},$$

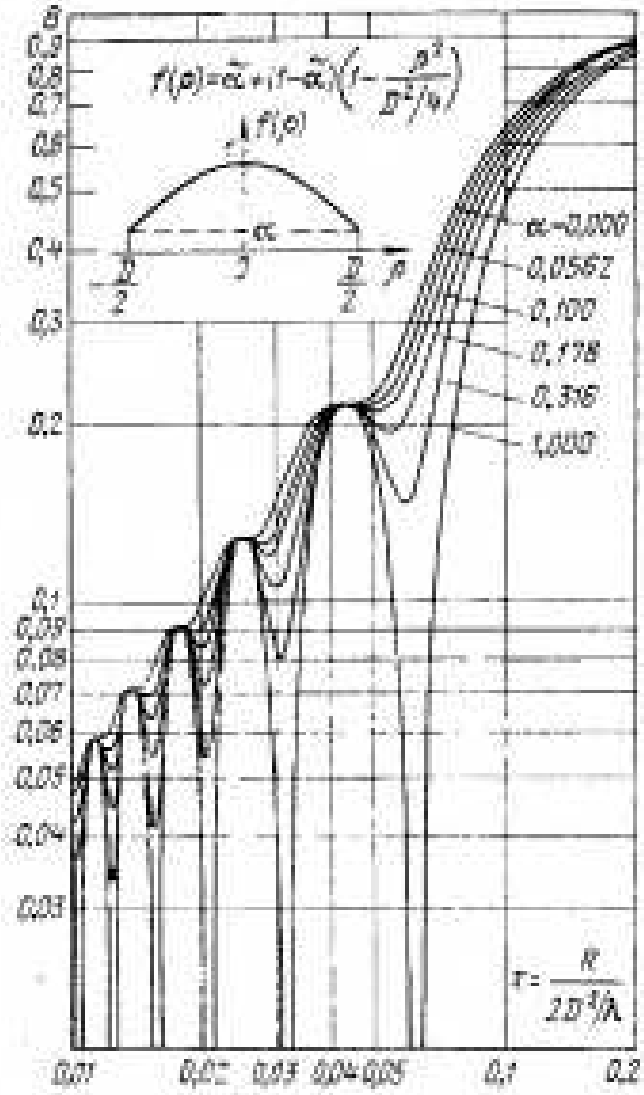


Рис. 4.2.3. Зависимость коэффициента B от приведенного расстояния x круглой апертуры при $\tilde{n}=1$.

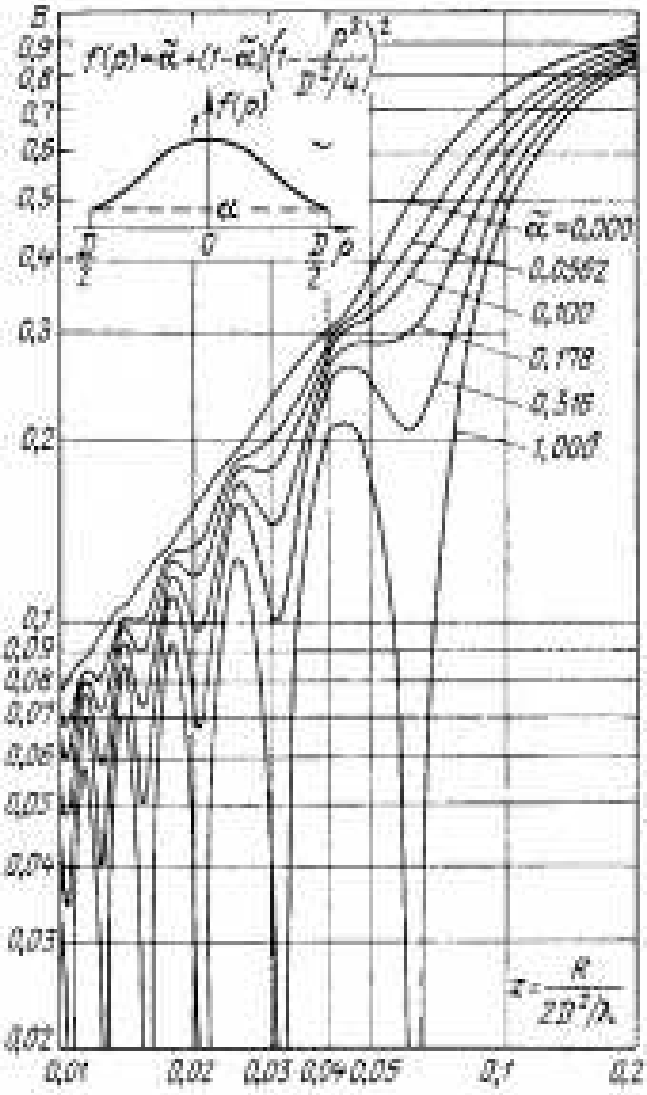


Рис. 4.2.4. Зависимость коэффициента B от приведенного расстояния x круглой апертуры при $\tilde{n}=2$.

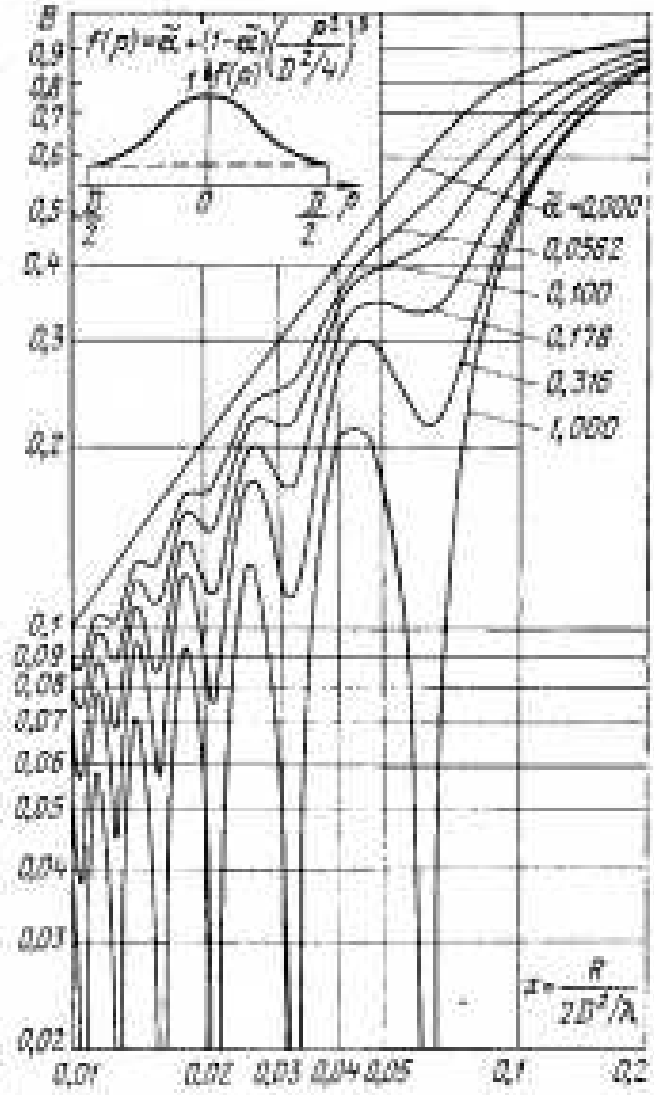


Рис. 4.2.5. Зависимость коэффициента B от приведенного расстояния x круглой апертуры при $\tilde{n}=3$.

$$\psi_1 = \frac{1}{2\sqrt{x}} + \left(\tilde{n} - 2i - \frac{2u}{\pi}\right)\sqrt{x},$$

$$\psi_2 = -\frac{1}{2\sqrt{x}} + \left(\tilde{n} - 2i - \frac{2u}{\pi}\right)\sqrt{x},$$

$$x = \frac{R}{2L^2/\lambda}; \quad t = \frac{\pi L}{\lambda}\sin\tilde{\theta};$$

в плоскости θ $L = 2a$, $\tilde{\theta} = \bar{\theta}$; в плоскости φ $L = 2b$, $\tilde{\theta} = \bar{\varphi}$; c, s — интегралы Френеля; $N \neq \infty$ (означает конечность ряда).

На рис. 4.2.6—4.2.11 приведены диаграммы направленности, рассчитанные по формуле (4.2.15) для $\tilde{n} = 0{,}12$; $\tilde{u} = 0{,}316$; 0,1; 0. Диаграммы нормированы к значениям $|F(x, u)|^2$ при $u = 0$.

Зависимость диаграммы излучения *круглого раскрыва* от расстояния для функции распределения (4.2.10) определяется выражением (без нормировочного коэффициента)

$$|F(x, u)|^2 = |(\tilde{n}W_0(\gamma, u) + (1 - \tilde{n})W_n(\gamma, u)|^2, \quad (4.2.16)$$

где согласно [183]

$$W_0(\gamma, u) = \frac{1}{\gamma}[u_1(\gamma, u) + ju_2(\gamma, u)],$$

$$W_n(\gamma, u) = \left(\frac{2}{\gamma}\right)^n \frac{\partial^n}{\partial \gamma^n} W_n(\gamma, u),$$

$$\gamma = \frac{\pi}{8x}; \quad x = \frac{R}{2L^2/\lambda}; \quad u = \frac{\pi L}{\lambda}\sin\theta;$$

$u_1(\gamma, u)$ и $u_2(\gamma, u)$ — функции Ломмеля первого рода от двух переменных соответственно 1-го и 2-го порядков.

Результаты расчета диаграмм излучения круглого раскрыва для $\tilde{n} = 1$; 2 приведены на рис. 4.2.12—4.2.17.

При расчете огибающей **краевого дифракционного излучения** в ближней зоне необходимо учесть следующие факторы, которыми сопровождается приближение точки наблюдения к зеркалу (рис. 4.2.18):

— изменение соотношения амплитуд краевых волн за счет увеличения разницы в расстояниях от противоположных кромок зеркала до точки наблюдения;

— изменение углового сдвига между фазовыми фронтами краевых волн;

— изменение соотношения амплитуд краевых волн, определяемых диаграммами направленности из-за неравенства углов θ_1 и θ_2;

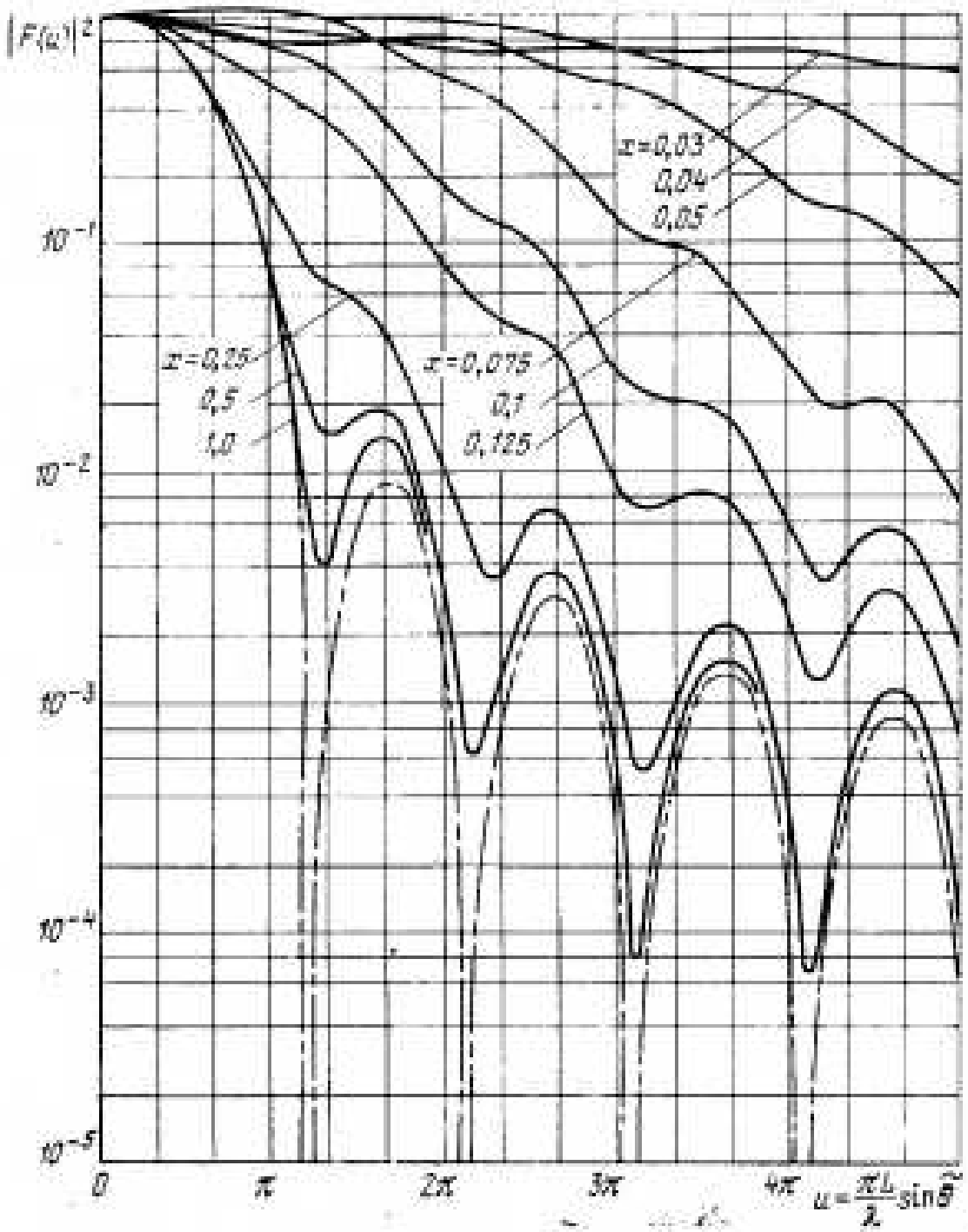


Рис. 4.2.6. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $N=1$, $\bar{a}=0{,}316$.

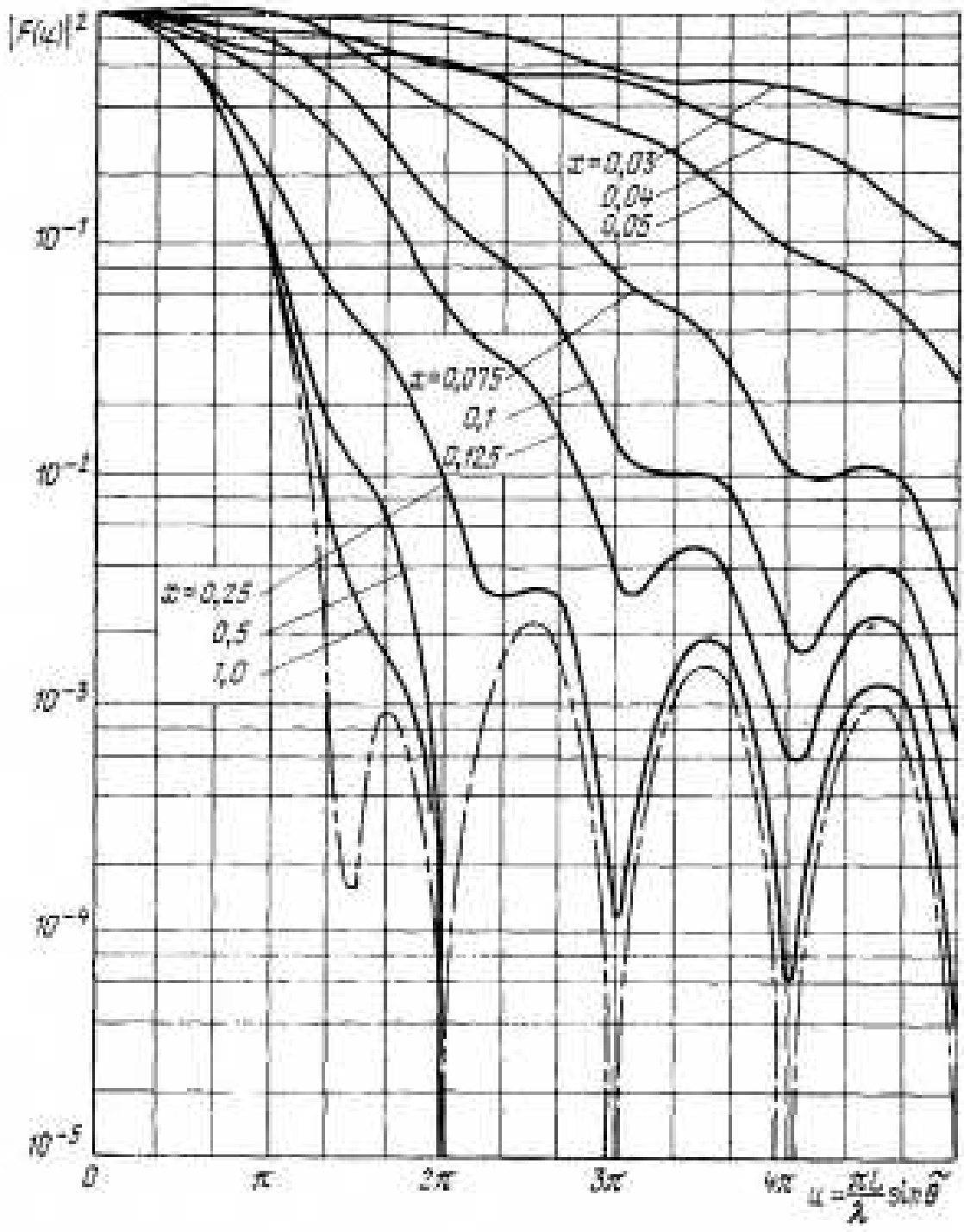


Рис. 4.2.7. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $\bar{n}=1$, $\tilde{a}=0,1$.

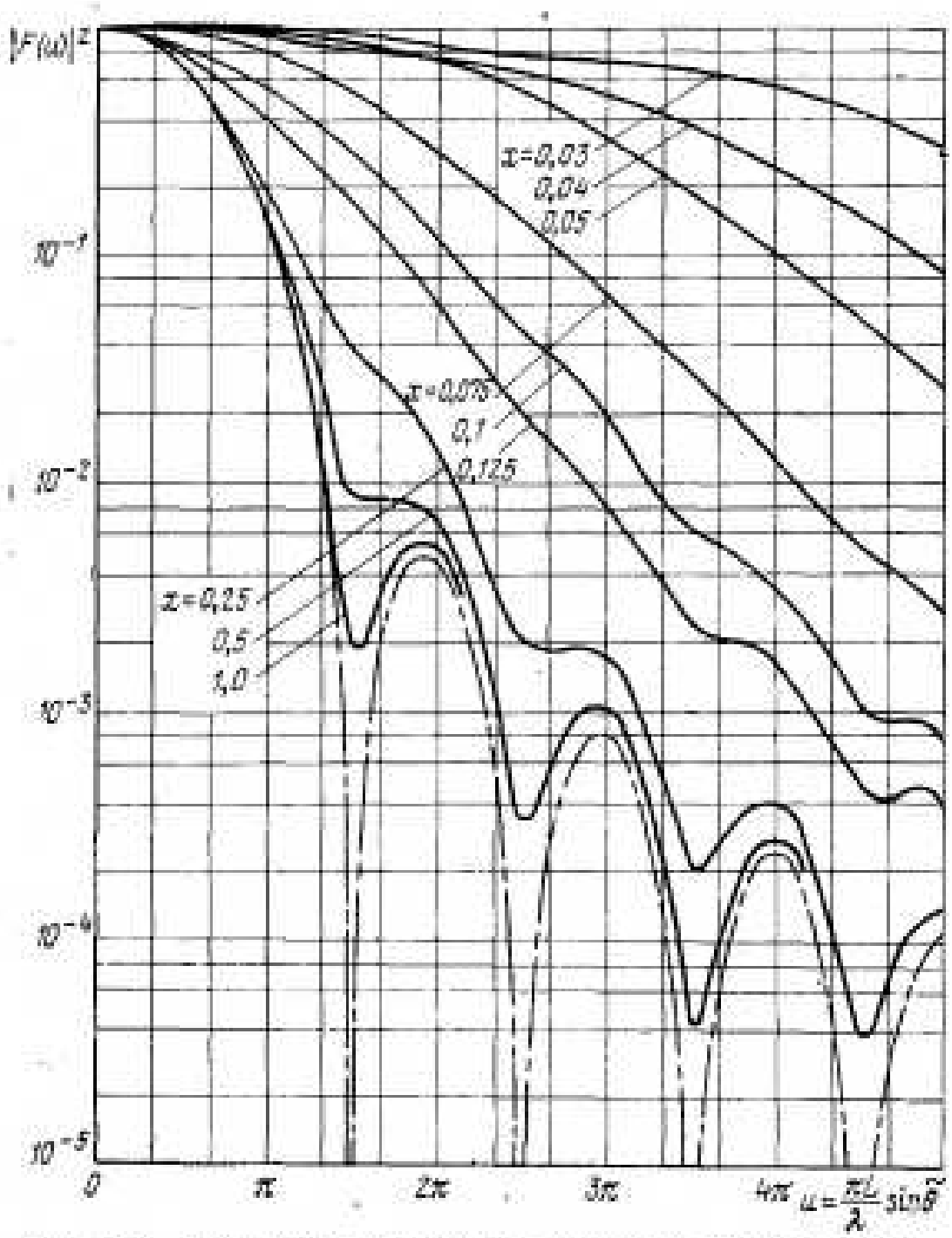


Рис. 4.2.8. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $\bar{a}=1$, $\tilde{\alpha}=0$.

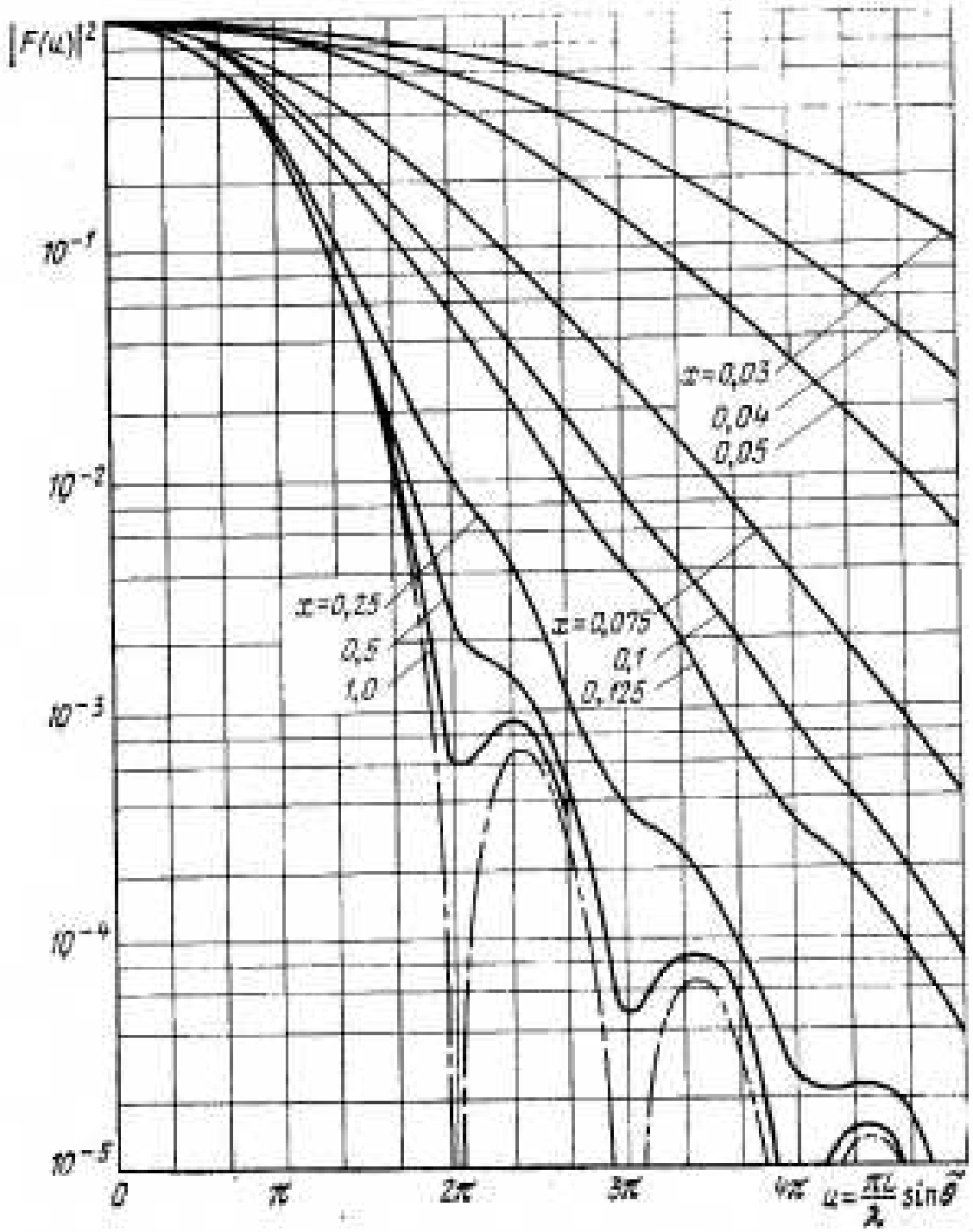


Рис. 4.2.9. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $N=2$, $\bar{a}=0{,}316$.

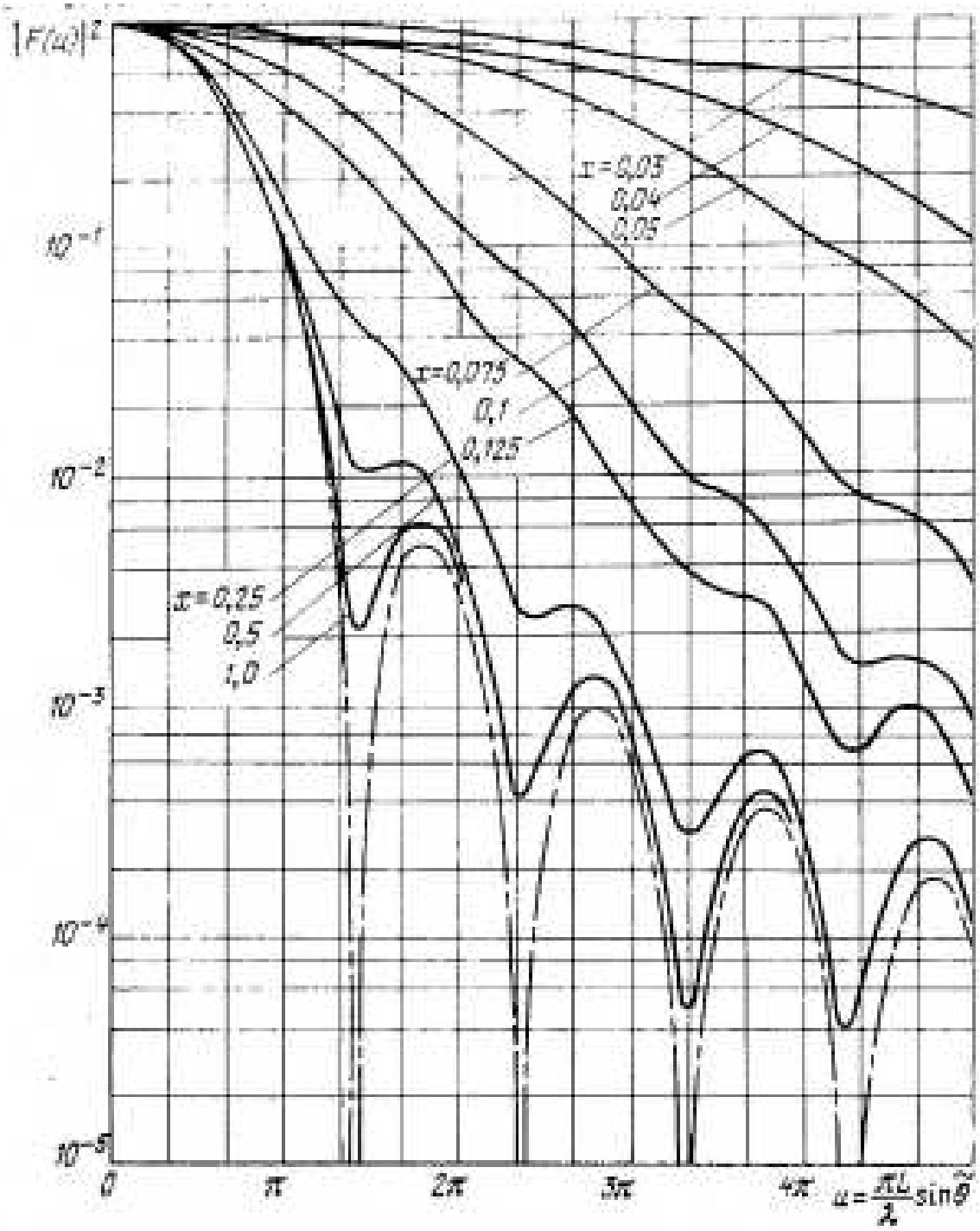


Рис. 4.2.10. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $N=2$; $\alpha=0,1$.

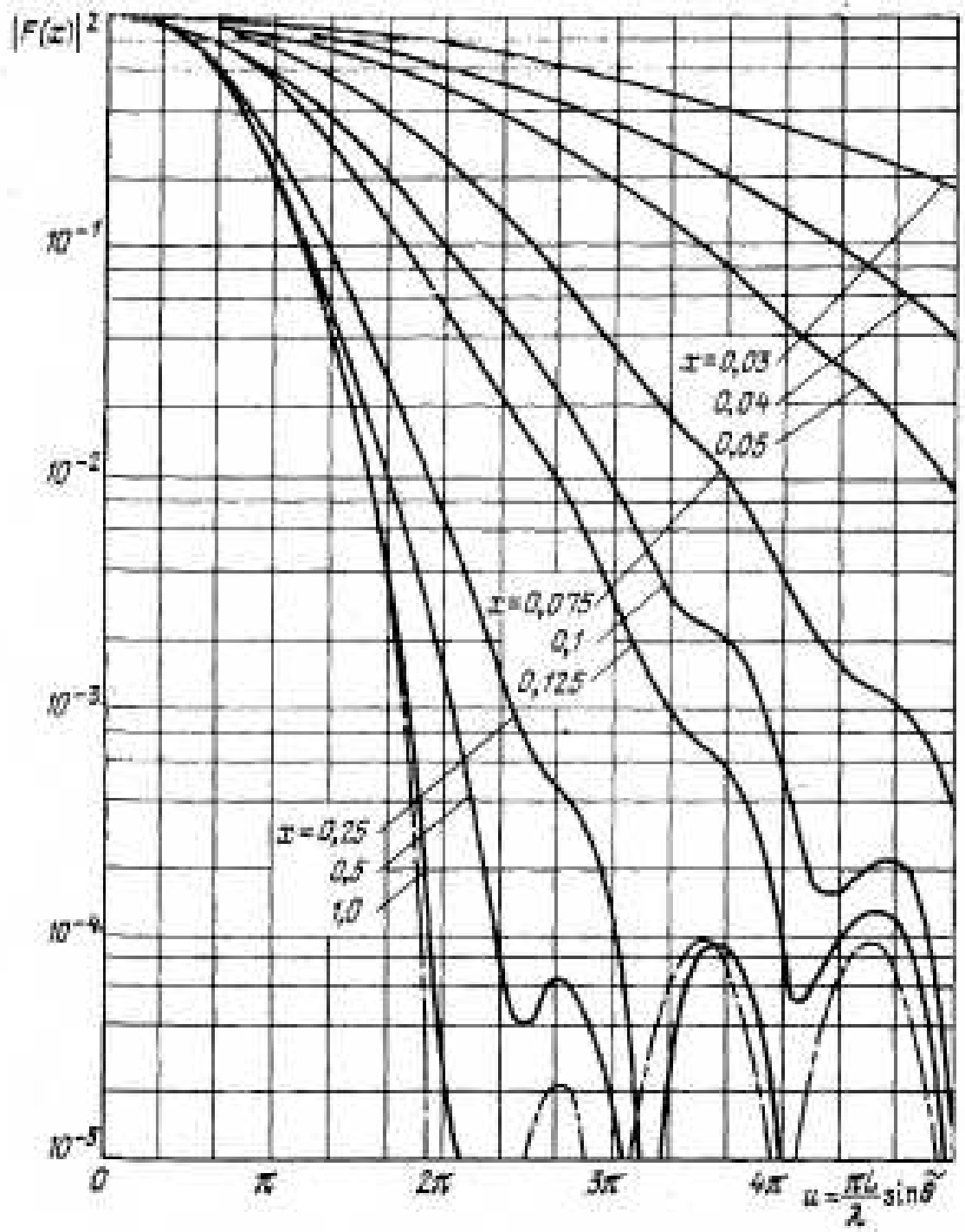


Рис. 4.2.11. Диаграммы излучения по мощности линейного источника для $\bar{K}=2$, $\tilde{\alpha}=0$.

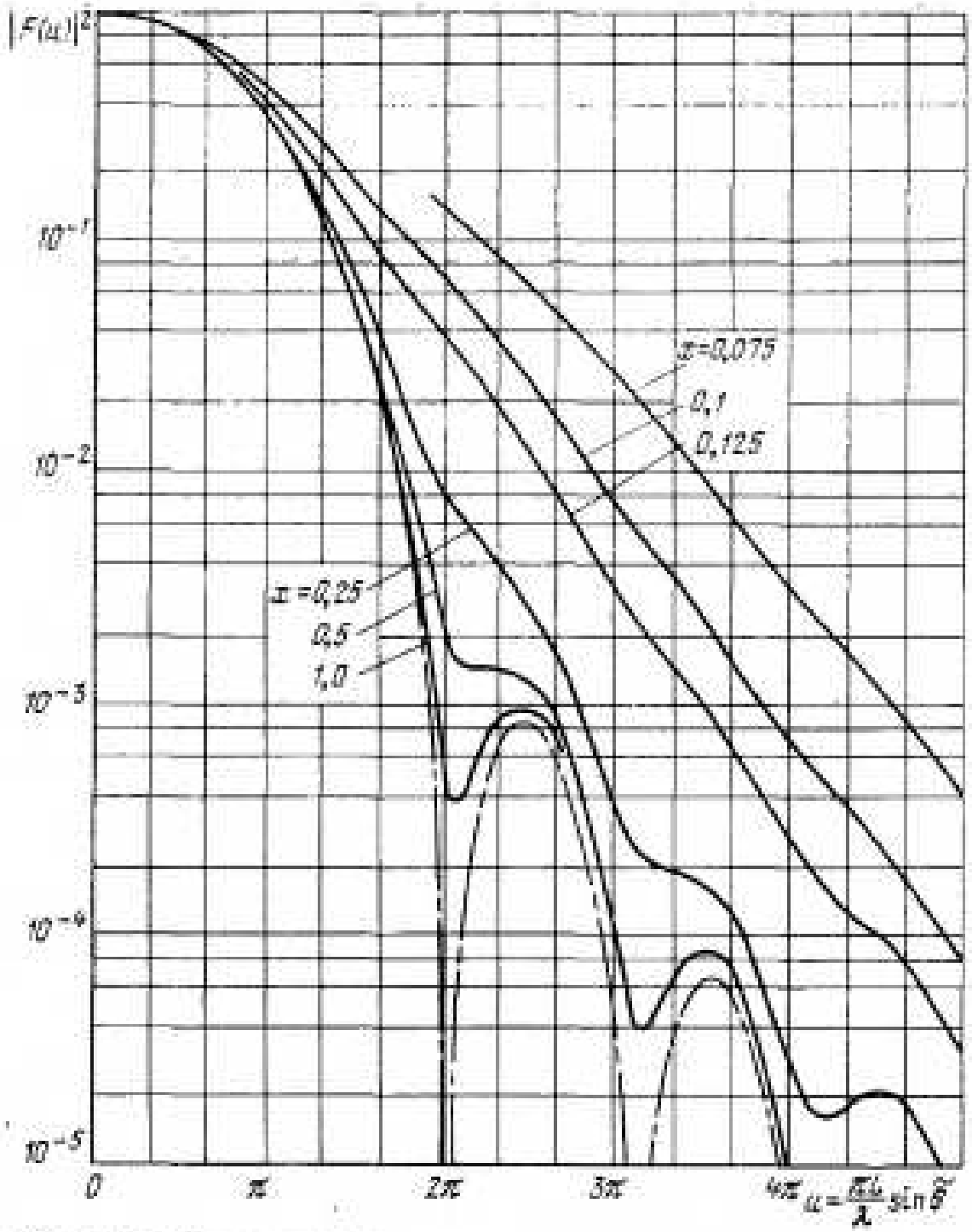


Рис. 4.2.12. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $\bar{n}=1$, $\bar{\alpha}=0{,}316$.

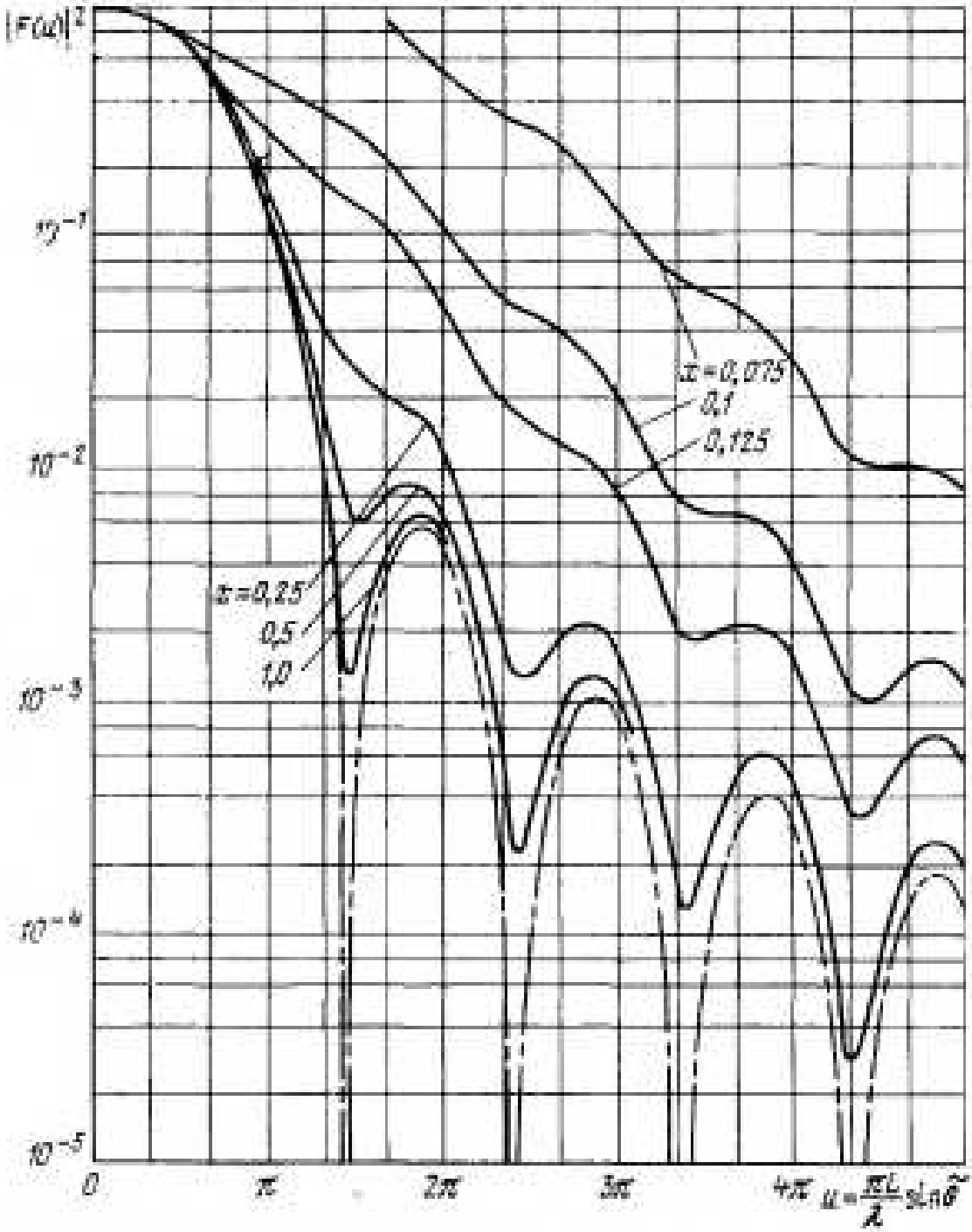


Рис. 4.2.13. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $\bar{n}=1$, $\tilde{\alpha}=0,1$.

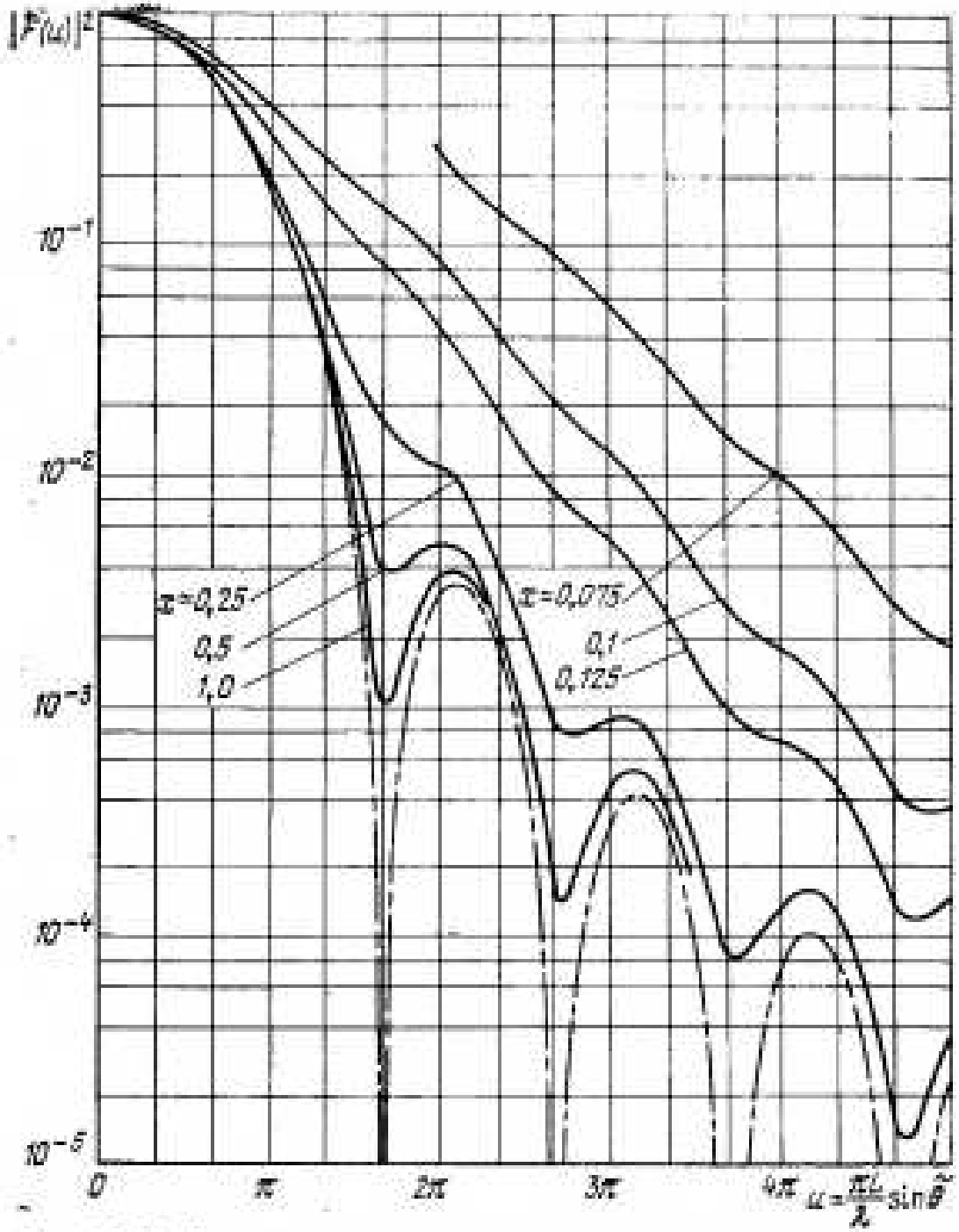


Рис. 4.2_14. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $\bar{n}=1$, $\bar{\alpha}=0$.

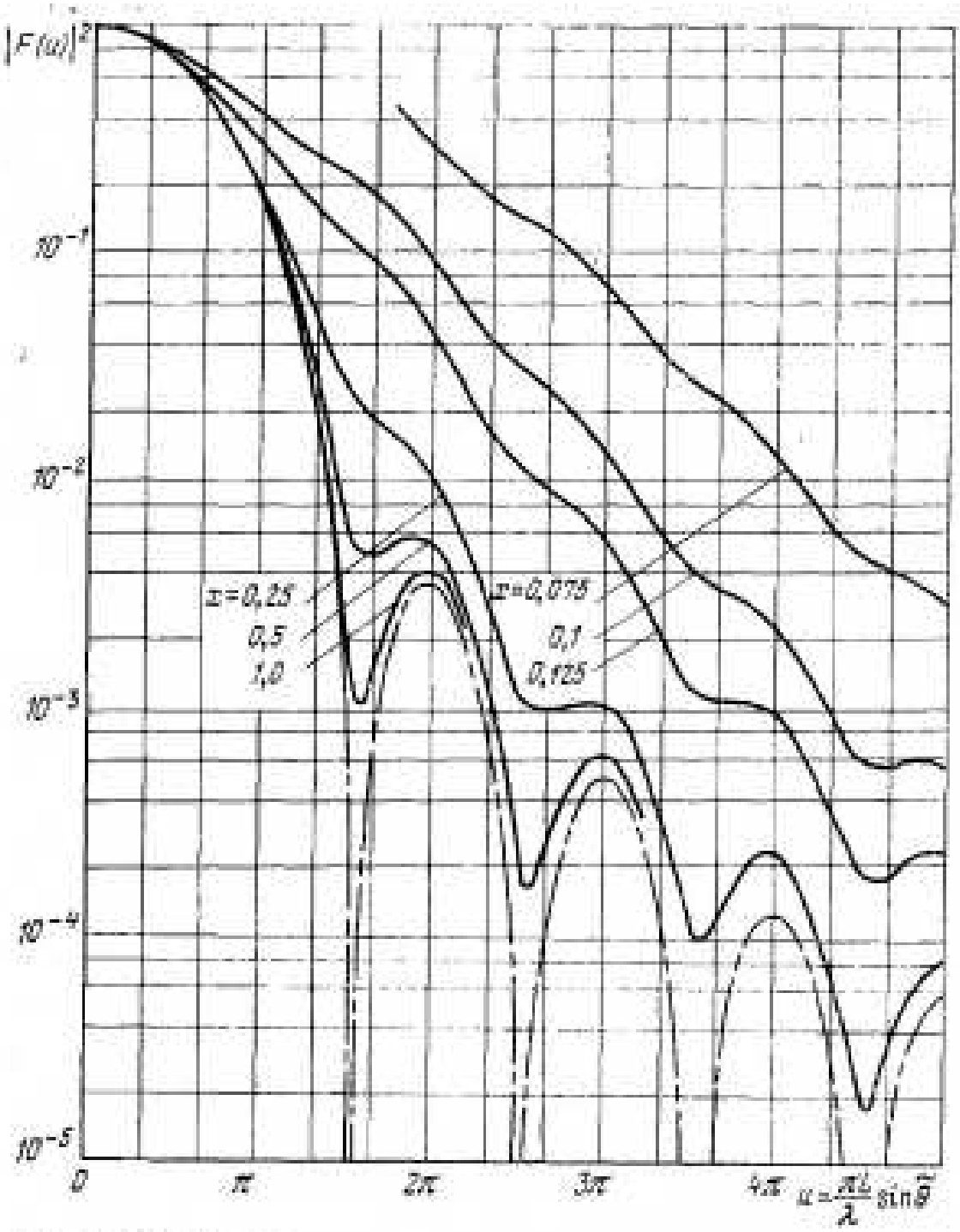


Рис. 4.2.15. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $n=2$, $\tilde{a}=0{,}316$.

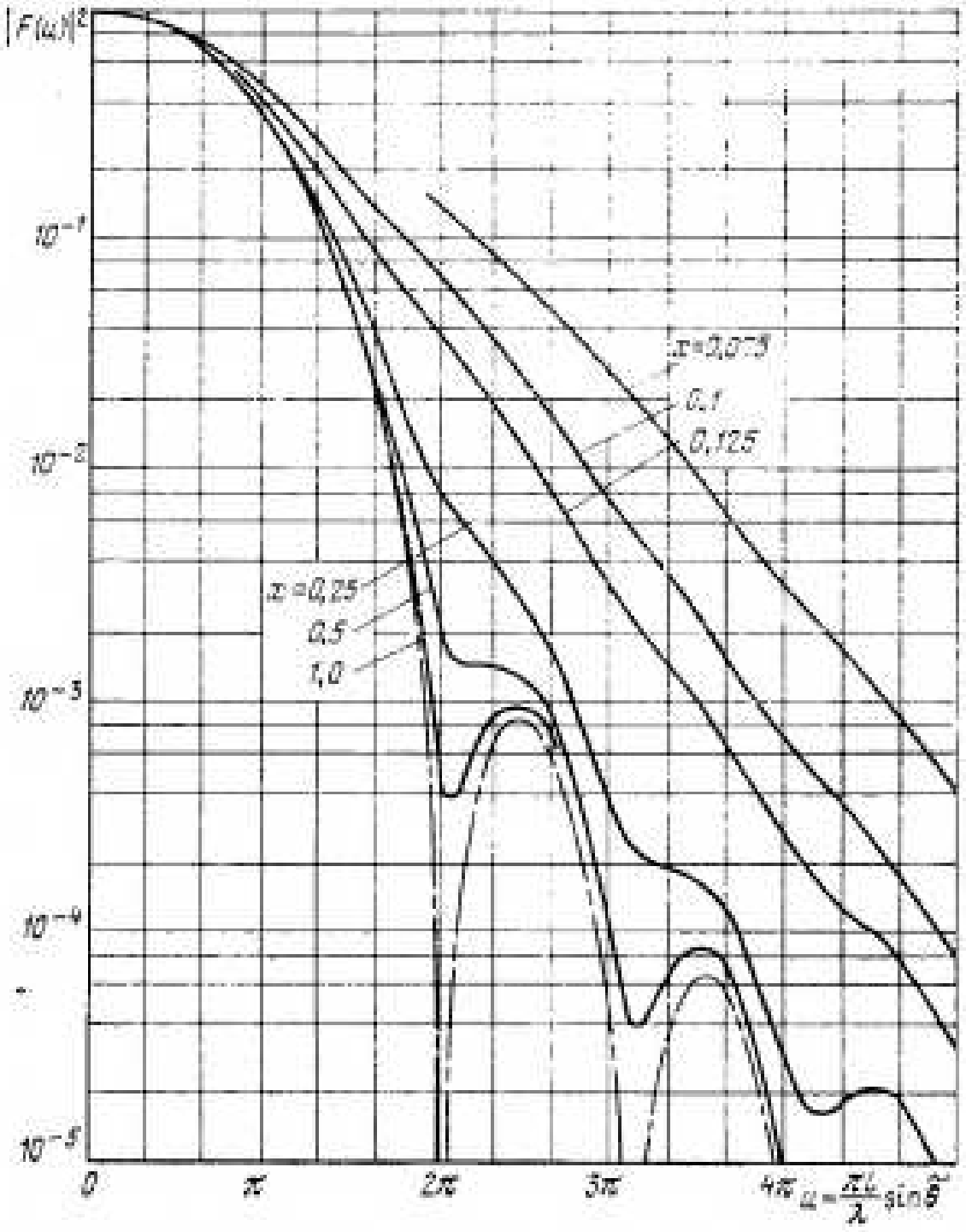


Рис. 4.2.16. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $\bar{R}=2$, $\bar{a}=0,1$.

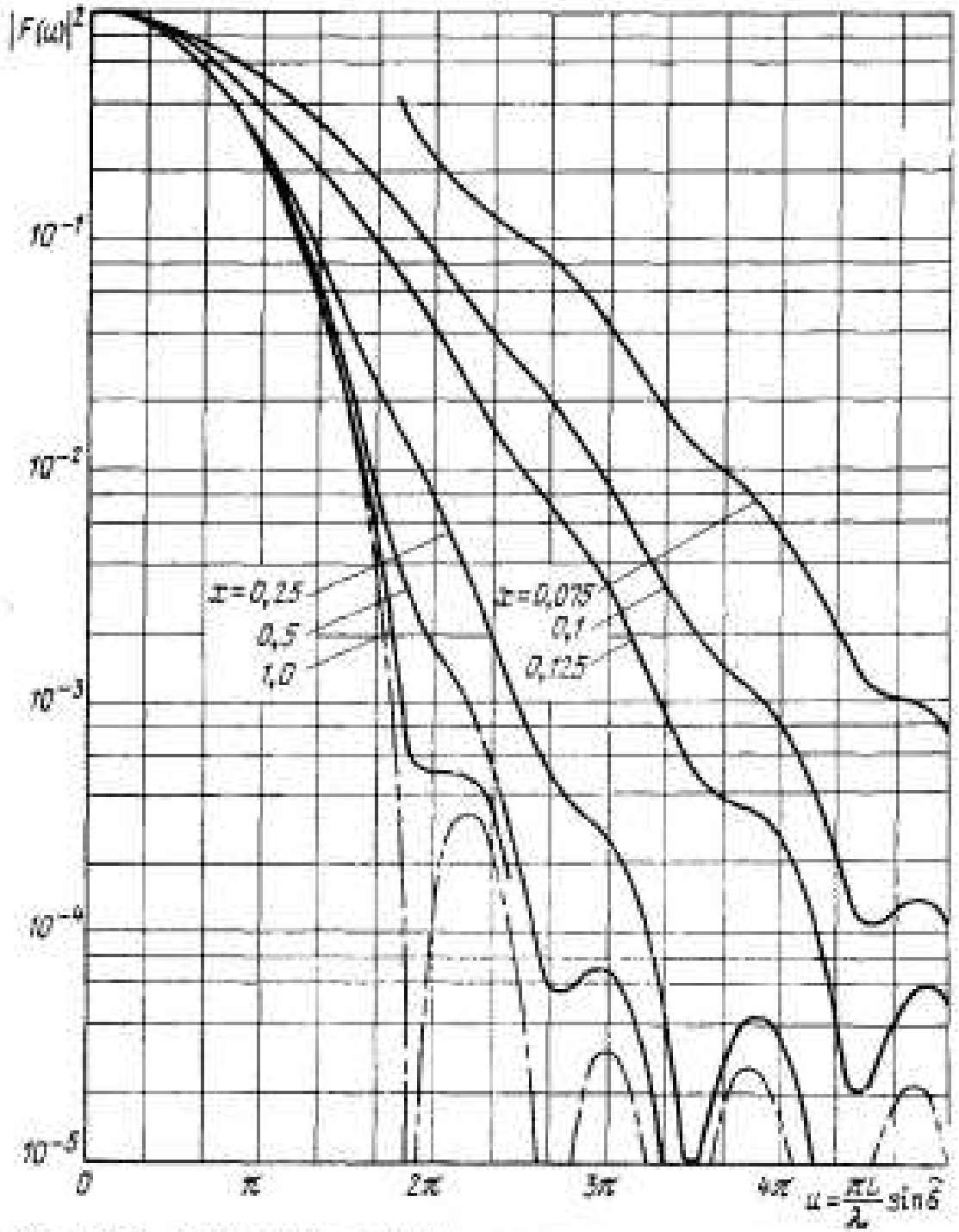


Рис. 4.2.17. Диаграммы излучения по мощности круглого раскрыва для $K=2$, $\tilde{a}=0$.

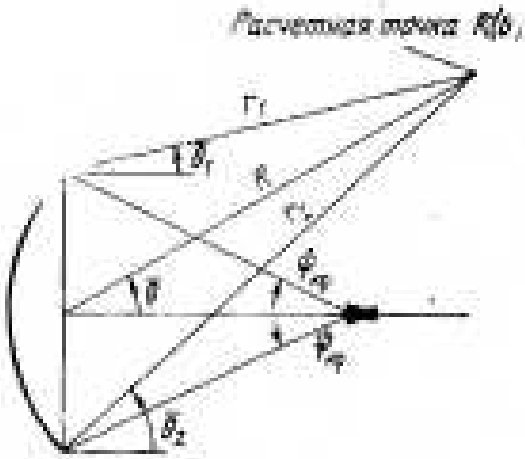


Рис. 4.2.18. К расчету краевого дифракционного излучения.

— изменение углового распределения краевых волн и их отражений от поверхности зеркала.

Учет последнего из перечисленных факторов хотя и возможен, но встречает определенные трудности, так как в ближней зоне угловое распределение краевых волн и их отражений различно для различных расстояний. Поэтому для упрощения будем полагать, что формирование краевого дифракционного излучения происходит в результате интерференции только двух краевых волн и что затенения краевых волн зеркалом нет.

На рис. 4.2.19 и 4.2.20 приведены огибающие бокового излучения цилиндрического зеркала в виде зависимостей величин M_E и M_H от θ для $\psi_{кр}=30°$, 60° и приведенных расстояний $x'=R/L=1\ldots15$; $\Pi_{макс}=P_{изл}/Sk_{изл}$ — поле в центре апертуры. После нахождения по графикам M_E и M_H находятся значения ППМ в плоскостях E и H:

$$\Pi_E=\frac{\lambda}{L}M_E\Pi_{макс}\alpha^2 \text{ и } \Pi_H=\frac{\lambda}{L}M_H\Pi_{макс}\alpha^2.$$

Огибающие бокового излучения круглого раскрыва приведены на рис. 4.2.21, 4.2.22.

В отношении пределов применимости приведенных формул необходимо отметить следующее. Если графики для определения краевого поля могут применяться вплоть до непосредственной близости к апертуре, то применение графиков рис. 4.2.3—4.2.17 ограничено зоной Френеля, ближняя граница которой может быть определена из рис. 4.2.23 [186].

4.2.4. Поле сфокусированных апертур. Фокусировка поля антенны заключается в создании такого фазового распределения поля по апертуре, при котором на заданном конечном расстоянии R_Φ (в точке фокуса) обеспечивается синфазное сложение полей, излучаемых элементарными источниками.

В зеркальных антеннах фокусировка практически достигается смещением облучателя из фокуса зеркала вдоль продольной оси. Как известно, эффект фокусировки наилучшим образом проявляется в зоне Френеля. Нетрудно показать, что может быть получено следующее выражение для КНД круглой сфокусированной апертуры в зоне Френеля:

$$D(R,\ R_\Phi)=D_\infty B_\Phi, \qquad (4.2.17)$$

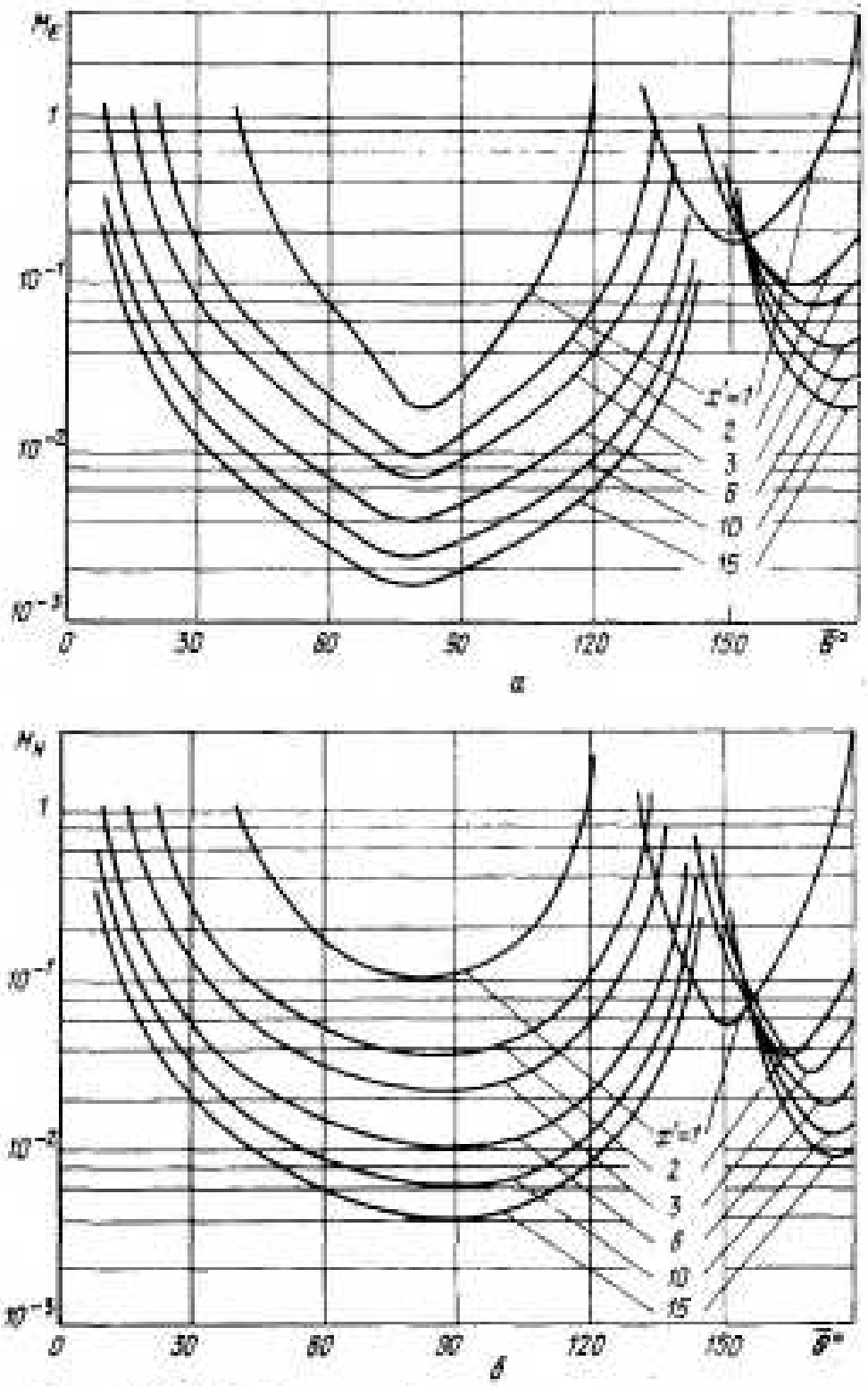


Рис. 4.2.19. Огибающие бокового излучения цилиндрического зеркала при $\psi_{кр}=30°$:

а — в *E*-плоскости (вектор **H** параллелен кромке), *б* — в *H*-плоскости (вектор **E** параллелен кромке).

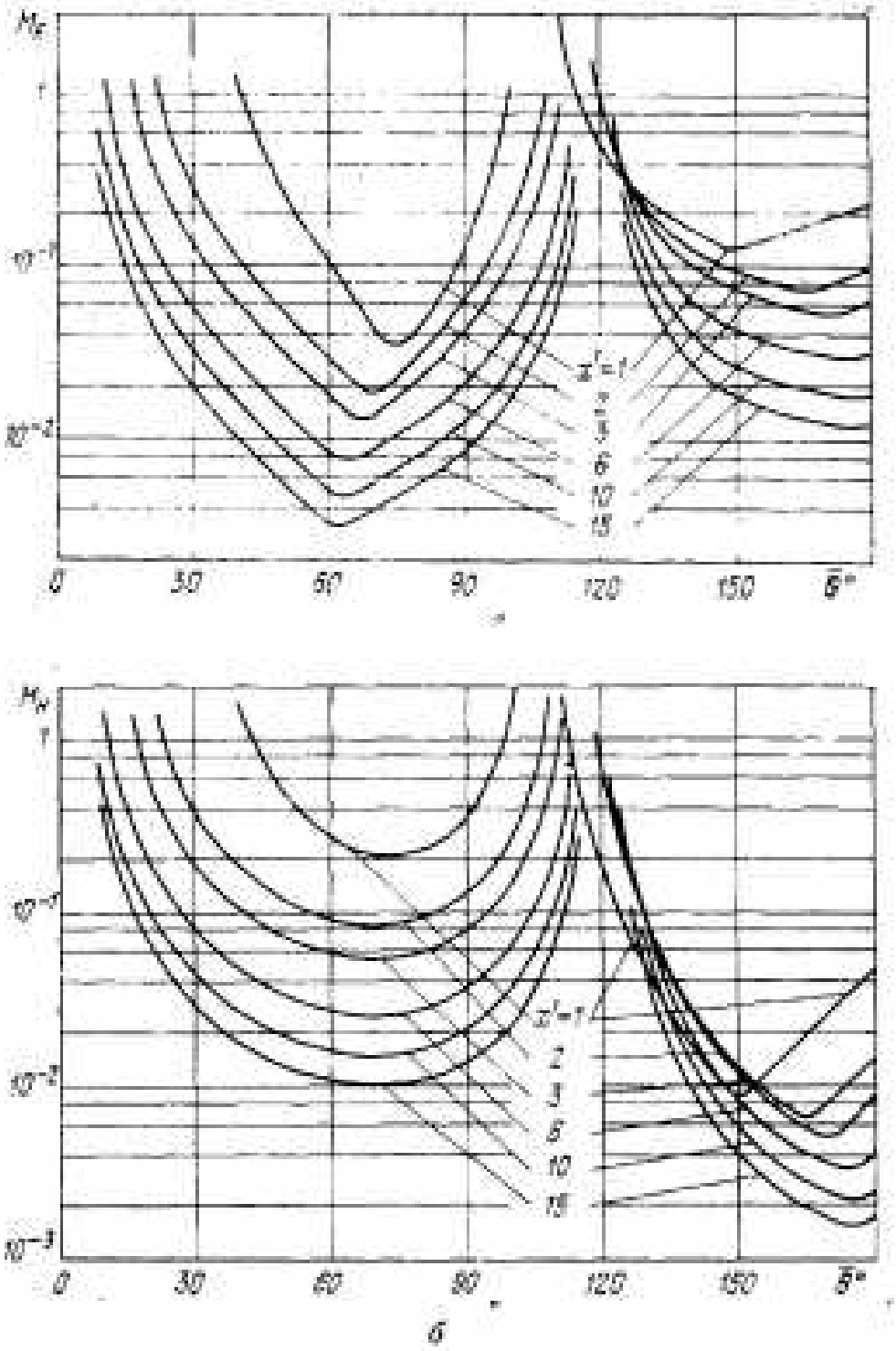


Рис. 4.2.20. Огибающие бокового излучения цилиндрического зеркала при $\Psi_{кр}=60°$:
а — в E-плоскости; б — в H-плоскости.

где выражение для B_ϕ не отличается по существу от подобного выражения для B несфокусированной апертуры. Разница заключается лишь в том, что в первом R умножено на безразмерную величину q, характеризующую относительное удаление заданной точки от даль-

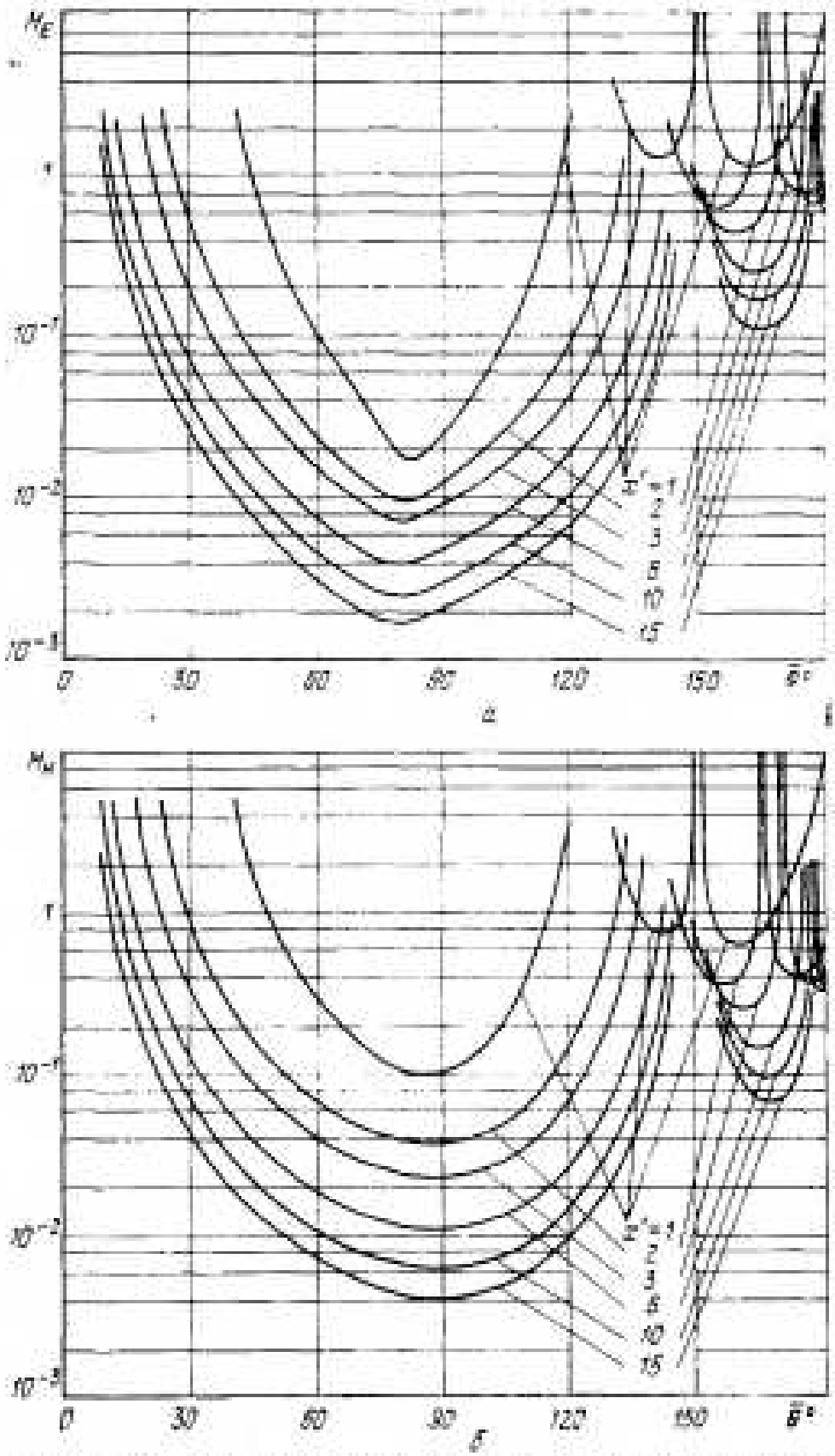


Рис. 4.2.21. Огибающие бокового излучения круглого раскрыва при $\psi_{0.р}=30°$:
а — в Е-плоскости, б — в Н-плоскости.

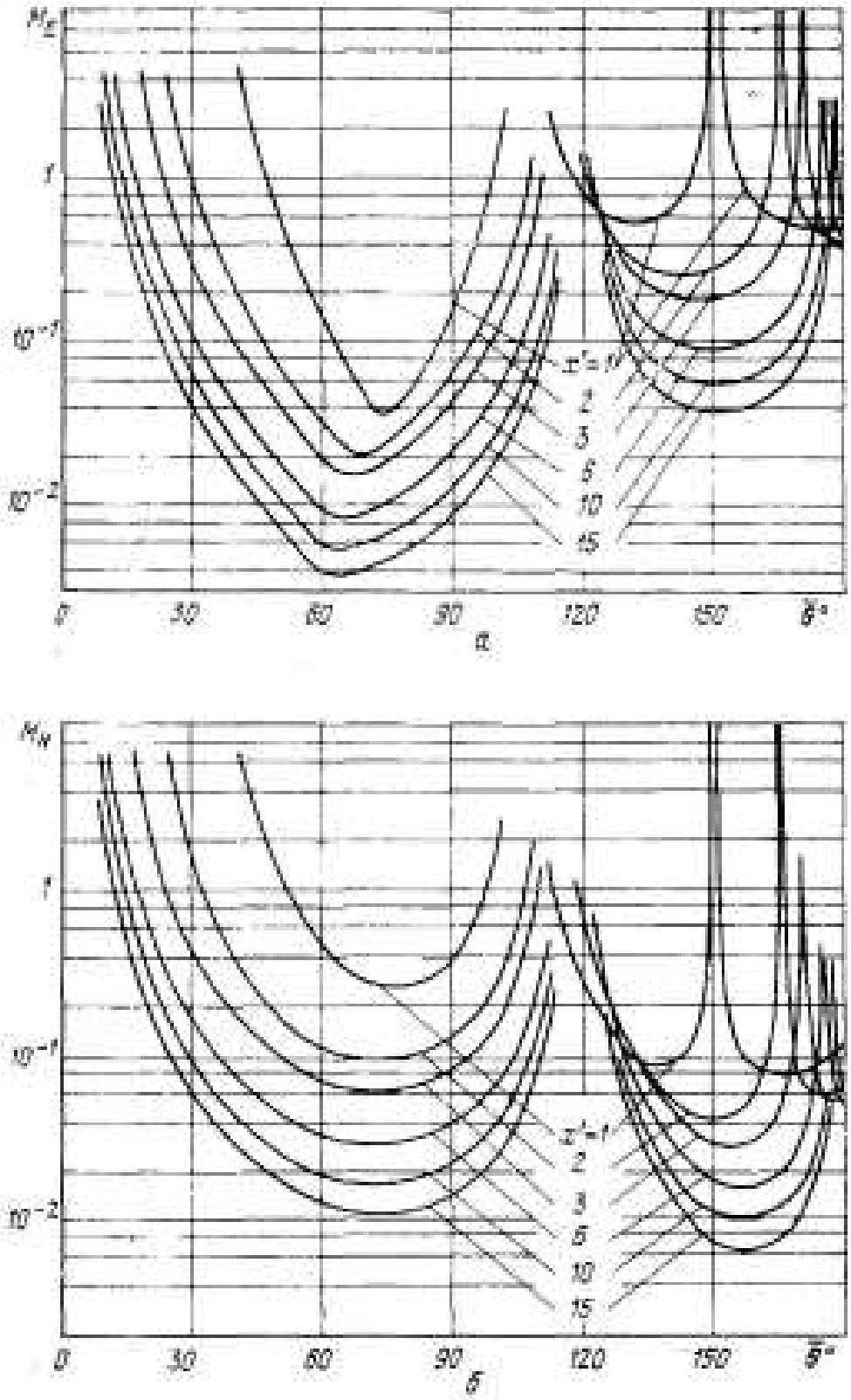


Рис. 4.2.22. Огибающие бокового излучения круглого раскрыва при $\psi_{кр}=60°$:
а — в E-плоскости, б — в H-плоскости.

ности фокусировки ($q=R_\Phi/(|R_\Phi-R|)$, R_Φ — дальность фокусировки).

Поэтому если принять, что амплитудное распределение поля в апертуре определяется функцией (4.2.8), то для определения КНД сфокусированной апертуры можно непосредственно использовать графики рис. 4.2.3—4.2.5, заменив в них R на qR. В точке фокуса (при $R=-R_\Phi$) $q=\infty$ и $B=1$. Следовательно, КНД сфокусированной апертуры в точке фокуса равен КНД синфазной апертуры в бесконечности. Аналогичный результат получается и для диаграммы излучения круглой сфокусированной апертуры, т. е. для ее определения можно использовать формулу (4.2.16) и графики рис. 4.2.3—4.2.5 и 4.2.12—4.2.17 при условии замены R на qR.

Нетрудно убедиться, что подобные результаты могут быть получены также в отношении КНД и диаграммы излучения прямоугольной сфокусированной апертуры.

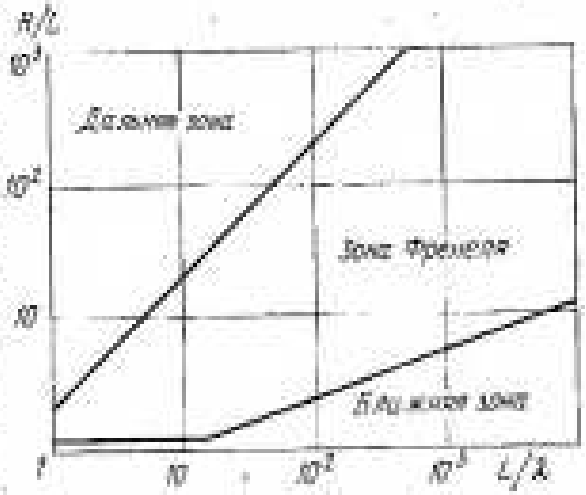


Рис. 4.2.23. Зоны антенны в зависимости от R, L и λ.

Таким образом, можно сделать следующий важный вывод: известные результаты анализа КНД и диаграммы излучения синфазных апертур в зоне Френеля (формулы и графики) могут быть распространены на апертуры, сфокусированные на конечном расстоянии путем замены R на qR. Это означает, что при прочих равных условиях КНД и диаграмма излучения сфокусированной апертуры на расстоянии qR соответственно равны КНД и диаграмме направленности синфазной апертуры на расстоянии R, а синфазная апертура по существу представляет частный случай сфокусированной апертуры при $q=1$.

При расчете огибающей краевого дифракционного излучения сфокусированной зеркальной антенны можно пренебречь изменением уровня поля на ее краях за счет смещения облучателя из фокуса зеркала и, следовательно, использовать уже известные формулы для синфазных апертур.

Как мы видели выше, такие методы расчета поля, как токовый, апертурный и краевых волн, требуют значительного объема исходных данных, причем далеко не всегда расчетчик-прогнозист может иметь эти данные до ввода конкретной станции в эксплуатацию. Кроме того, даже при полном наличии данных оказывается, что расчет на основе готовых формул или графиков всей картины излучений в зоне действия конкретной антенны — дело довольно трудоемкое и поэтому далеко не всегда реализуемо. Между тем, расчет ППМ в пределах пространственных ограничений, интересующих гигиену СВЧ (при допущениях относительно необходимой точности расчета, см. § 4.1), может быть проведен Р-методом.

Применение такого метода для целей радиогигиены является весьма эффективным, если иметь в виду необходимость оценки потенциальной опасности на основании огибающих максимумов поля и допущение реальной точности прогноза порядка $\pm(3 \ldots 6)$ *дБ.*

Напомним, что основой Р-метода расчета является «ретроспективный» принцип: считается, что параметры диаграммы направленности известны, и расчет поля синфазных антенн на ближних расстояниях (с точностью до огибающих) может быть проведен уже с использованием этой информации.

В общем случае, как это было принято и выше (§ 4.2), поле в главных плоскостях на небольших угловых расстояниях от электрической оси антенны предполагается определять в виде функции с разделяющимися переменными:

$$\Pi(R, \theta, \varphi) = \Pi_A f(R) F(\theta, \varphi, R), \qquad (4.3.1)$$

где $\Pi(R, \theta, \varphi)$ — ППМ на расстоянии $R\theta$ (или $R\varphi$) от центра раскрыва, Π_A — уровень поля в центре раскрыва антенны, $f(R)$ — «продольная» функция зависимости осевого поля от расстояния, $F(\theta, \varphi, R)$ — «поперечная» функция зависимости поля от угла в плоскости θ (или φ) и расстояния (учет расстояний при определении F был дан в § 4.2).

4.3.1. Осевое поле антенн. На практике для приближенных расчетов осевое поле антенн принято разбивать на две зоны: ближнюю и дальнюю, при этом гаранти-

руемая точность на стыке зон составляет около 1,5 дБ [84]. В дальней зоне, где диаграмму направленности можно считать сформированной, уровень поля определяется известным соотношением

$$П_д = P_{изд} G / 4\pi R^2, \qquad (4.3.2)$$

где $П_д$ — рассчитываемая интенсивность осевого поля в дальней зоне.

За границу дальней зоны принимается расстояние

$$R_д = 2L^2_{макс}/\lambda, \qquad (4.3.3)$$

где $L_{макс}$ — максимальный размер антенны.

Вблизи антенны до расстояния не далее 2 ... 4 раскрывов антенны вся мощность распространяется внутри

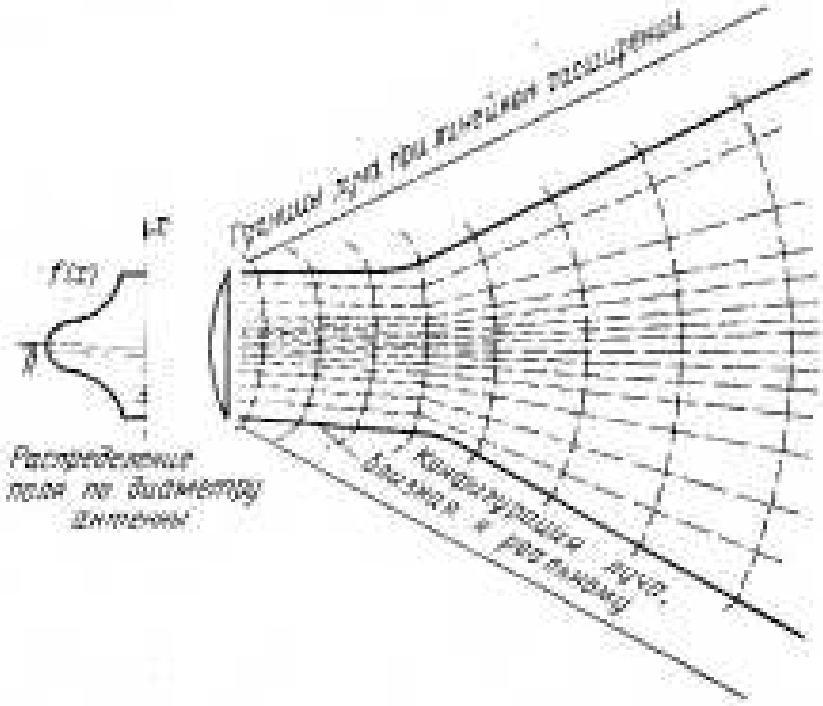


Рис. 4.3.1. Распределение плотности «пучков» в реальной антенне на небольшом расстоянии от антенны повторяет распределение поля по апертуре.

гипотетического цилиндра (рис. 4.3.1) с площадью основания, равной площади апертуры. Плотность лучей внутри этого цилиндра непостоянна и распределение плотности мощности по диаметру пучка повторяет распределение первичного поля по раскрыву. Для упроще-

ния реальный пучок лучей в ближней зоне заменяется пучком с равномерной по его сечению плотностью мощности, определяемой следующим выражением:

$$П_б = P_{изл}/Sk_{исп}, \qquad R \leqslant 0{,}25R_д, \tag{4.3.4}$$

где $k_{исп} = k_a \cdot k_b$; k_a, k_b — коэффициенты, определяемые функциями амплитудного распределения вдоль соответствующих сторон апертуры. Здесь, как и ранее, считается, что функция распределения поля по плоской прямоугольной апертуре является разделяющейся по осям, соответствующим пересечению с плоскостью апертуры двух главных плоскостей диаграммы антенны. Эти оси направлены параллельно сторонам апертуры $2a$ (вертикальный размер) и $2b$ (горизонтальный размер) и обязательно проходят через центр апертуры.

Формулы (4.3.2) и (4.3.4) обеспечивают вполне достаточную точность (не ниже ± 3 дБ); их основной недостаток — необходимость предварительного расчета границ зон для последующего выбора одной из формул.

Возможность снижения точности расчета на промежуточных расстояниях позволяет заметно упростить физическую модель осевого поля, предположив линейное изменение его интенсивности от величины $P_{изл}/4abk_{исп}$ на малых расстояниях до $P_{изл}G/4\pi R^2$ на больших. Считая, что для синфазного прямоугольного раскрыва $G = 16\pi abk_a k_b/\lambda^2$ и имея в виду выражение для расстояния до границы дальней зоны (4.3.3), т. е.

$$R_{дa} = 8a^2/\lambda \text{ и } R_{дb} = 8b^2/\lambda, \tag{4.3.5}$$

получаем

$$П_д = \frac{P_{изл}4\pi \cdot 2a \cdot 2b \cdot k_a k_b}{4\pi \cdot R^2 \cdot \lambda^2} = \frac{P_{изл}}{(4/k_a k_b)\,(2a2b)^2\, x_a x_b}, \tag{4.3.6}$$

где $x_{a,b} = R/R_{дa,b}$ для соответствующей плоскости.

Обратим внимание, что знаменатель правой части выражения (4.3.6) можно рассматривать как площадь прямоугольника $S_{пр}$, через которую проходит вся излучаемая мощность $P_{изл}$. Площадь прямоугольника в ближней зоне

$$S_{пр\,б} = (2ak_a)\,(2bk_b), \tag{4.3.7}$$

а на больших расстояниях в дальней зоне ($x \geqslant 1$)

$$S_{пр\,д} = \left(\frac{2}{k_a} 2ax_a\right)\left(\frac{2}{k_b} 2bx_b\right). \tag{4.3.8}$$

Если бы расширение луча при распространении излучаемой энергии вдоль расстояния x проходило линейно, то длину каждой из сторон прямоугольника можно было бы определить как

$$L(x)=\left(kL+\frac{2}{k}Lx\right). \qquad (4.3.9)$$

В плоскости θ ($\varphi=0$, рис. 4.2.2)

$$x=x_a,\ k=k_a,\ L=2a.$$

В плоскости φ ($\theta=0$)

$$x=x_b,\quad k=k_b,\quad L=2b.$$

Тогда выражение для осевой плотности мощности можно записать так:

$$\Pi_0=\frac{P_{изл}}{S\left(k_a+\frac{2}{k_a}x_a\right)\left(k_b+\frac{2}{k_b}x_b\right)}=$$

$$=\frac{P_{изл}}{S\Phi_b(x_a)\Phi_b(x_b)}, \qquad (4.3.10)$$

где $\Phi_b(x)=k+2x/k$.

На малых расстояниях формула (4.3.10) соответствует выражению (4.3.4), на больших — (4.3.2). Действительно, при $x\to 0$

$$\Pi_0=\frac{P_{изл}}{Sk_ak_b}=\frac{P}{Sk_{вои}},$$

а при $x\to\infty$ с учетом (4.3.3) и (4.2.16)

$$\Pi_0=\frac{P_{изл}k_{вои}}{S\cdot 4x^2}=\frac{P_{изл}k_{вои}\cdot 4\pi L^2}{4R^2\pi L^2}=\frac{P_{изл}G}{4\pi R^2}.$$

Очевидно, наибольшую погрешность расчета по формуле (4.3.10) следует ожидать на промежуточных расстояниях; это подтверждается практически: наибольшее расхождение с экспериментальными данными и данными, полученными точными расчетными методами, находится на расстояниях $x=0{,}1$ и составляет 3 ... 7 дБ [70].

Для коррекции зависимости $\Phi_b(x)$ введем нелинейный корректирующий член $\alpha(x)$:

$$\Phi_b(x)=k+(2x/k)\alpha(x) \qquad (4.3.11)$$

так, чтобы

1. $a(0)=0$;
2. $\Phi_k(0)/\Phi_k(0{,}1)=0{,}7\ \ldots\ 0{,}9$, (4.3.12)

т. е. принимается, что при $x=0{,}1$ плотность мощности на оси квадратной апертуры снижается по сравнению с плотностью мощности в апертуре на 1 ... 3 дБ. Это приблизительно соответствует данным [70, 141];

3. $\Phi_k(1)/\Phi_k(0{,}8)\approx\sqrt{2}$; (4.3.13)
4. $a(1)\approx 1$; (4.3.14)
5. $\lim\limits_{x\to 1} a(x)=1$.

Таким образом, общий вид зависимостей огибающих функций плотности мощности осевого поля от расстояния [70, 141] предполагает введение корректирующей функции $a(x)$, такой, чтобы ее первая производная была положительной, а вторая — отрицательной. Подобным требованиям удовлетворяет ряд функций, простейшая из которых для дальнейших расчетов записывается так:

$$a(x)=(2/\pi)\operatorname{arctg}\eta_k x. \qquad (4.3.15)$$

Такая форма записи полностью удовлетворяет условиям 1 и 5. При $\eta_k>1$ выражение (4.3.15) удовлетворяет и условию 4. Найдем величину η_k, необходимую для выполнения условия 3. Для этого в соответствии с (4.3.13) запишем

$$\frac{\Phi_k(1)}{\Phi_k(0{,}8)}=\frac{k+2/k}{k+(2\cdot 0{,}8/k)\,(2/\pi)\operatorname{arctg}0{,}8\eta_k}=\sqrt{2}. \qquad (4.3.16)$$

Решим уравнение (4.3.16) относительно η_k. Для $k_{ucn}=1$ $\eta_k=4{,}6$, для $k_{ucn}=0{,}4$ $\eta_k=3{,}82$, однако для соблюдения одновременно условий 3 и 4 примем окончательно $\eta_k=4{,}6$ (вводимая при этом погрешность расчета Π_0 на расстоянии $x=0{,}8$ находится в пределах менее 0,7 ... 1 дБ). Для проверки выполнения условия 2 запишем

$$\frac{\Phi_k(0)}{\Phi_k(0{,}1)}=\left(1+\frac{2\cdot 0{,}1}{k}\,\frac{2}{\pi}\operatorname{arctg}0{,}46\right)^{-1}. \qquad (4.3.17)$$

Для средних $k_{ucn}=0{,}4\ \ldots\ 0{,}7$ оказывается $\Phi_k(0)/\Phi_k(0{,}1)=0{,}75\ \ldots\ 0{,}88$, т. е. условие 2 выполняется. Таким образом, уравнение (4.3.10) может быть представлено так *:

$$\Pi_k(R)=\Pi_S\Big/\left[k_a+\frac{1}{k_a}\Phi(x_a)\right]\left[k_b+\frac{1}{k_b}\Phi(x_b)\right], \qquad (4.3.18)$$

где $\Phi_k(x)=(4x/\pi)\operatorname{arctg}4{,}6x$; $\Pi_S=P_{изл}/S$; для упрощенных расчетов можно принять $k_a^2=k_b^2=k_{ucn}=0{,}7$ или лучше воспользоваться данными табл. 4.2.1 и 4.2.2.

Формулу (4.3.18) можно использовать и для расчета поля круглых апертур, имея в виду, что здесь $k_a=k_b$,

* Синтез уравнения (4.3.18) является следствием важного допущения, что формирование луча в обеих главных плоскостях происходит независимо друг от друга, а суммарный эффект является суперпозицией частных эффектов по обеим плоскостям.

$x_a = x_b$; $S = \pi a^2$, где a — радиус апертуры. При сравнении с апертурным методом ошибки такого расчета на промежуточных расстояниях возрастают для равномерного облучения на 3 ... 4 дБ.

При $2a \neq 2b$ *для антенн в целом нельзя считать характерным понятие зон*, во всяком случае, «зонные» эффекты таких антенн гораздо менее выражены, чем для круглых или квадратных. В частности, глубина осцилляций осевого поля таких антенн будет меньше, но они будут проявляться вплоть до расстояний $x_0 = 0{,}1 \ldots 0{,}3$ (для $b > a$).

Представим значения k в зависимости от важного для определения бокового поля параметра — уровня первого бокового лепестка δ_1 [дБ] (здесь и далее берется абсолютное значение). Представление функции $k(\delta_1)$ в аналитической форме в явном виде связано со значительными трудностями математического характера. По этой причине придется воспользоваться функцией $k(\delta_1)$, представленной в табличной форме (табл. 4.2.1 и 4.2.2) и на рис. 4.3.2 точками, каждую из которых можно рассматривать как частное значение определенной функции $k(\delta_1)$. С достаточной для дальнейших применений точностью это семейство функций можно заменить одной функцией. Аппроксимируем зависимость полиномами 1-й и 2-й степени (варианты I и II) так:

$$k_{\mathrm{I}}(\delta_1) = a_{\mathrm{I}}\delta_1 + b_{\mathrm{I}}, \tag{4.3.19}$$

$$k_{\mathrm{II}}(\delta_1) = a_{\mathrm{II}}\delta_1^2 + b_{\mathrm{II}}\delta_1 + c. \tag{4.3.20}$$

Решив системы уравнений [19], определим коэффициенты a, b, c (принимаются в расчет только точки с $\delta_1 < 30$ дБ).

Вариант I

$$\left.\begin{aligned} \overset{*}{a}_{1,1} - a_1 a_2 - b_1 a_1 = 0, \\ \overset{*}{a}_1 - a_1 a_2 - b_1 = 0 \end{aligned}\right\} \tag{4.3.21}$$

и вариант II

$$\left.\begin{aligned} a_{\mathrm{II}} a_4 + b_{\mathrm{II}} a_3 + c_{\mathrm{II}} a_2 = \overset{*}{a}_{2,1}, \\ a_{\mathrm{II}} a_3 + b_{\mathrm{II}} a_2 + c_{\mathrm{II}} a_1 = \overset{*}{a}_{1,1}, \\ a_{\mathrm{II}} a_2 + b_{\mathrm{II}} a_1 + c_{\mathrm{II}} = \overset{*}{a}_1. \end{aligned}\right\} \tag{4.3.22}$$

где

$$\alpha_1 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}^2,$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}^3, \quad \alpha_4 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}^4,$$

$$\overset{*}{\alpha}_{1,1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}k_i, \quad \overset{*}{\alpha}_{2,1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_{1i}^2 k_i, \quad \overset{*}{a}_1 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}k_i.$$

Сглаживающие функции по найденным коэффициентам a, b, c для общего случая (линейного источника и круглой апертуры) имеют вид

Вариант I

$$k = -0{,}0158\delta_1 + 1{,}241 \qquad (4.3.23)$$

Вариант II

$$k = -0{,}00091\delta_1^2 + 0{,}036\delta_1 + 0{,}804. \qquad (4.3.24)$$

Зависимости $k(\delta_1)$ приведены на рис. 4.3.2. Из рисунка видно, что в практических расчетах необходимо пользоваться квадратичной сглаживающей функцией. Для удобства расчетов функции $\Phi(x)$ и $k(\delta_1)$ представлены графически на рис. 4.3.3.

4.3.2. Боковое поле в дальней зоне. В подавляющем большинстве случаев расчетная точка находится не на

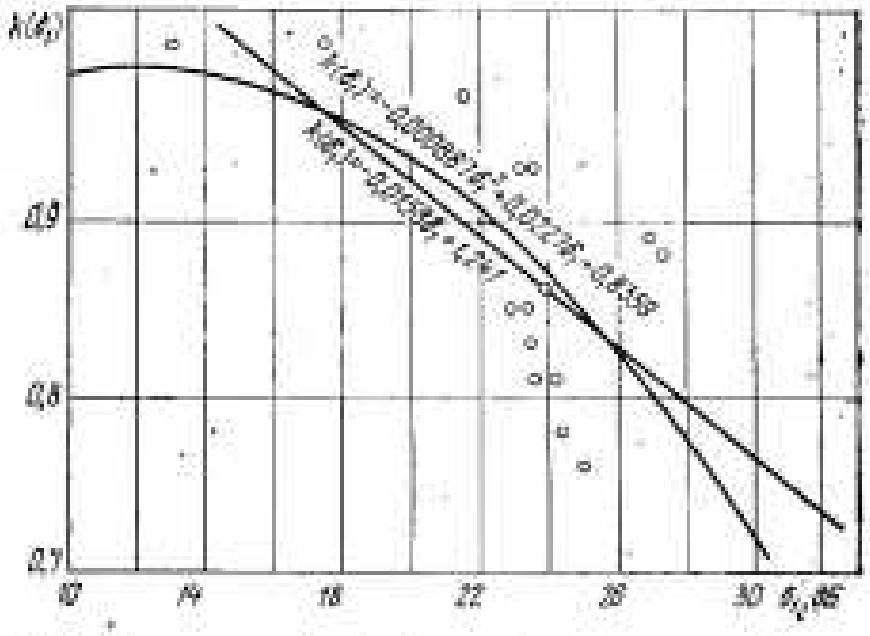


Рис. 4.3.2. Зависимость k (δ_1) для общего случая (круглый раскрыв и линейный источник).

оси основного луча, а на некотором угловом расстоянии от электрической оси антенны. Если известна диаграмма направленности антенны станции, то уровень бокового излучения в дальней зоне можно определить так:

$$П = П_0 \cdot F(\bar{\theta}\,\bar{\varphi}), \qquad (4.3.25)$$

где $П_0$ — П.ПМ в центре луча на заданном расстоянии; $F(\bar{\theta}, \bar{\varphi})$ — нормированная по амплитуде диаграмма направленности в плоскости углов: вертикального θ и горизонтального φ (рис. 4.2.2).

Существенные различия диаграмм направленности различных типов антенн и очень часто вообще отсутст-

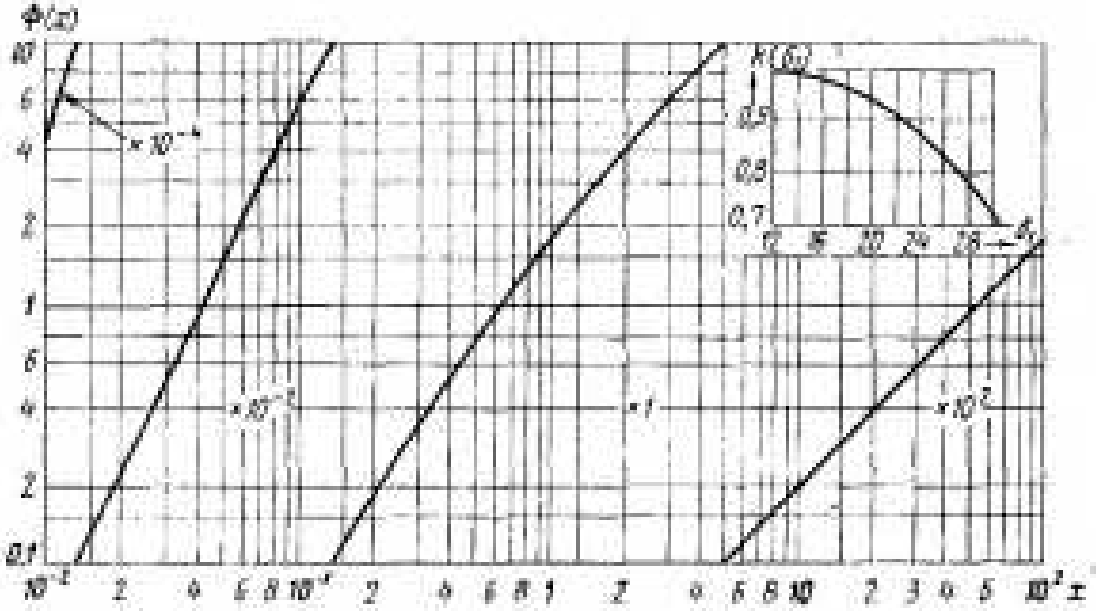


Рис. 4.3.3. «Дальняя» функция $\Phi(x)$ и коэффициент k (δ_1).

вие данных о величине лепестков дальше первого делают зачастую невозможным на практике расчет бокового поля даже в дальней зоне.

Анализ диаграмм направленности излучающих круглой и прямоугольной площадок, соответствующих нескольким крайним случаям их освещения, показал возможность нахождения *обобщенной поперечной масштабной функции* (*М*-функции) изменения уровня по углу, если в качестве ее аргумента принять не абсолютные, а нормированные к ширине диаграммы направленности по половинной плотности мощности значения углов $\bar{\theta}$ *:

* Здесь и далее угол $\bar{\theta}$ может быть заменен (для горизонтальной плоскости) углом $\bar{\psi}$. В общем случае при расчете полей не только в дальней зоне угол $\bar{\theta}$ заменяется углом θ (рис. 4.3.7).

$$n = \bar{\theta}/2\theta_{0,5}, \qquad (4.3.26)$$

где $\bar{\theta}$ — угол между направлением «расчетная точка — центр апертуры» и осью излучения.

M-функция — это зависимость относительного уровня бокового поля по огибающей от угла. Обобщенной она названа потому, что, как мы увидим дальше, такая зависимость, выраженная в функции аргументов: нормированного угла n и уровня первого бокового лепестка δ_1 — оказывается общей для большого класса синфазных апертур. Таким образом, масштабная функция $M(n, \delta_1)$ тесно связана с диаграммой направленности $F(\theta)$:

$$M(\bar{\theta}/2\theta_{0,5};\ \delta'_1) = 20 \lg < F'(\bar{\theta}) >,$$

где $F'(\theta)$ — диаграмма направленности шириной $2\theta_{0,5}$ с уровнем первого бокового лепестка δ'_1, $< >$ — оператор взятия огибающей максимумов.

Рассмотрим асимптотические представления функций $F^2(u)$, описывающих диаграммы направленности синфазных плоских апертур [48] (табл. 4.3.1), и отрицательные логарифмы их огибающих

$$y = -2 \lg < F(u) >. \qquad (4.3.27)$$

Таблица 4.3.1

Некоторые параметры апертур с типовыми функциями освещения

Апертура	Освещение ($0 < x' < a$)	$F(u)$	$\frac{4\theta_{0,5}^2}{k}$	Уровень первого бокового лепестка δ_1, дБ
Прямоугольная	$E_a = \text{const}\ (x')$	$F_1(u) = \frac{\sin u}{u}$	0,89	—13,7
То же	$E_a \cos \pi x'/a$	$F_2(u) = \frac{\cos u}{1 - [(2/\pi)u]^2}$	1,18	—23
Круглая	$E_a = \text{const}\ (x')$	$F_3(u) \frac{2J_1(u)}{u}$	1,02	—17,6
То же	$E_a(1 - a^2)$	$F_4(u) = \Lambda_2(u)$	1,27	—24,6
То же	$E_a(1 - a^2)^2$	$F_5(u) = \Lambda_3(u)$	1,47	—30,6

Здесь $u = ka \sin \bar{\theta}$, $k = 2\pi/\lambda$; $2a$ — размер антенны в расчетной плоскости θ. Для малых углов $\sin \bar{\theta} \approx \bar{\theta}$, т. е.

$$u = ka\bar{\theta}. \tag{4.3.28}$$

В соответствии с таблицей (графа 4), ширина диаграммы направленности по уровню —3 дБ $2\theta_{0,5(1)} = 0{,}89\lambda/2a$ для функции $F_1 = \sin u_{(1)}/u_{(1)}$. Тогда, если принять в качестве аргумента приведенный угол n, получаем

$$u_{(1)} = 0{,}89\pi n. \tag{4.3.29}$$

Огибающая этой функции

$$y_1 = 2 \lg n + 0{,}894. \tag{4.3.30}$$

Аналогично

$$F_2 = \cos u_{(2)} \Big/ \left[1 - \left(\frac{2}{\pi} u_{(2)}\right)^2\right]; \quad u_{(2)} = 1{,}18\pi n,$$

т. е. при $n > 1$

$$y_{(2)} \approx 4 \lg n + 1{,}492. \tag{4.3.31}$$

Для приближенных вычислений $y_{(2)}$ можно воспользоваться нулевым приближением асимптотического разложения функции Бесселя [37]:

$$J_{\pm p}(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \left\{\cos\left(u \mp \frac{\pi}{2} p - \frac{\pi}{4}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{2u} \sin\left(u \mp \frac{\pi}{2} p - \frac{\pi}{4}\right)\right\}, \tag{4.3.32}$$

откуда

$$J_1(u) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi u}} \left\{\cos\left(u - \frac{3}{4}\pi\right) - \frac{1}{2u} \sin\left(u - \frac{3}{4}\pi\right)\right.$$

и при $n > 1$

$$y_{(3)} \approx 3 \lg n + 1{,}11. \tag{4.3.33}$$

Так как $J_p(u) = ((1/2 u)^p / p!)\, \Lambda_p(u)$, можно записать

$$\Lambda_p = J_p(u)\, p! / (1/2 u)^p. \tag{4.3.34}$$

Тогда

$$F_4^{-2}(u) \approx \left[\frac{u}{8 J_2(u)}\right]^2.$$

Из (4.3.34) следует

$$J_3(u) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi u}}\left\{\cos\left(u-\pi-\frac{\pi}{4}\right)-\right.$$

$$\left.-\frac{1}{2u}\sin\left(u-\pi-\frac{\pi}{4}\right)\right\}, \qquad (4.3.35)$$

$$y_{(4)} \approx 5\lg n + 1{,}42.$$

Наконец, для последнего случая $u_{(5)} = 1{,}47\pi n$

$$F^2_{(5)}(u) = \Lambda^2_3(u).$$

Воспользуясь выражениями (4.3.32) и (4.3.34), получаем

$$\Lambda_3(u) = 48u^2 I(u),$$

а логарифм огибающей

$$y_{(5)} \approx 7\lg n + 1{,}49. \qquad (4.3.36)$$

Таким образом, огибающие диаграмм направленности антенн, использующих простейшие законы освещения — степенные функции аргумента n (или $\bar{\theta}$), изображаемые в логарифмическом масштабе прямыми различного наклона. Естественно, эти прямые обязательно должны касаться максимумов всех боковых лепестков, включая первый.

Как видно из рис. 4.3.4, за общий центр пересечения всех огибающих можно принять точку A с координатами: $F_A^{-2} = 4{,}1$ (т. е. 6,1 дБ), $n_A = 0{,}66$. Точно определить координаты пересечения огибающих можно, решая попарно уравнения (4.3.30), (4.3.31), (4.3.33), (4.3.35) и (4.3.36).

Решение этих уравнений дает область точек с координатами $n_A = 0{,}5 \ldots 1{,}23$ и $F_A^{-2} = 0 \ldots 18{,}6$ дБ. Однако нетрудно видеть, что уточнение положения отрезка прямой слева от первого бокового лепестка физически не имеет смысла, так как он выполняет функцию заполнения провала между основным и первым боковым лепестками; для области $n > n_1$ (где n_1 — угловая координата первого бокового лепестка) изменение наклона огибающей при смещении точки A лишь незначительно сказывается на точности описания, причем максимальную дополнительную погрешность следует ожидать в области

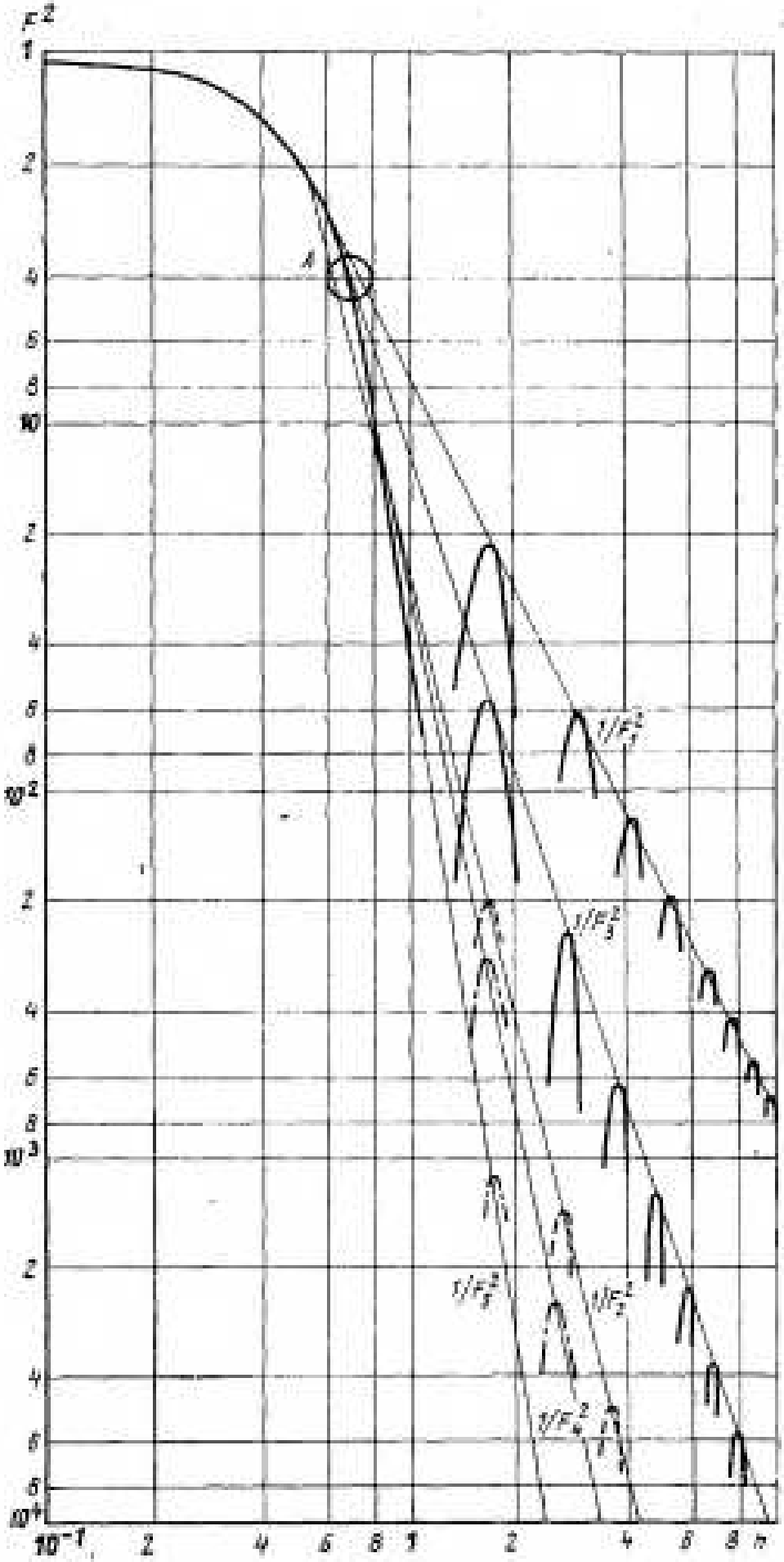


Рис. 4.3.4. Огибающие функций $F_1 \ldots F_5$ в двойном логарифмическом масштабе.

больших n. Итак, можно считать, что огибающие боковых лепестков имеют вид прямых линий, расходящихся из одной точки A (рис. 4.3.4) под углом, определяемым полностью положением и уровнем первого бокового лепестка.

Отметим, что диаграммы направленности, построенные в функции приведенного угла n, обладают еще одной особенностью: положение максимума первого бокового лепестка на оси абсцисс для всех рассмотренных функций приблизительно постоянно. Действительно, решая уравнения (4.3.30), (4.3.31), (4.3.33), (4.3.35) и (4.3.36) и относительно n при $y=0{,}1\delta_1$, получаем $n=1{,}67\pm0{,}07$.

Таким образом, для синфазных плоских апертур, имеющих диаграммы направленности типа $F_1 \ldots F_5$, в пределах ближних лепестков боковое поле в главных плоскостях по огибающей полностью определяется уровнем первого бокового лепестка.

Вспомним введенное выше понятие масштабной функции, или M-функции:

$$M(n)=\Pi_0(R)/\Pi(n, R), \qquad (4.3.37)$$

где Π — плотность мощности в точке с координатами (n, R), соответствующая огибающей диаграммы излучения; иногда удобнее пользоваться значением M-функции, выраженной в децибелах: $M=10\lg M$.

Очевидно, для $n>n_A$ величину масштабной функции можно определить из полученных n_A, n и F_A:

$$M'=M_{n>n_A}=6{,}1+s_0(\delta_1)(\lg n-\lg n_A). \qquad (4.3.38)$$

Значения $s_0(\delta_1)$ легко определить из простых геометрических соображений:

$$s_0(\delta_1)=\frac{\delta_1-6{,}1}{\lg n_1-\lg n_A}=\frac{\delta_1-6{,}1}{0{,}402}. \qquad (4.3.39)$$

Таким образом, в области $n>n_A$ выражение для масштабной функции в децибелах можно записать так:

$$M'(n)=6{,}1+\frac{\delta_1-6{,}1}{0{,}402}(\lg n+0{,}18). \qquad (4.3.40)$$

Преобразуем (4.3.40) так, чтобы получить выражение для M (в натуральных отношениях). Для этого выра-

жение для M' представим в виде

$$M'(n) = 10 \lg (\bar{M}_1 \bar{M}_2), \qquad (4.3.41)$$

где

$$\lg \bar{M}_1 = 0{,}61;$$

$$\lg \bar{M}_2 = [(\delta_1 - 6{,}1)/4{,}02](\lg n + 0{,}18).$$

Имея в виду, что $\lg n + 0{,}18 = \lg 1{,}52n$, получаем

$$\bar{M}(n) = 4{,}08\,(1{,}52n)^{s(\delta_1)}, \qquad (4.3.42)$$

где $s(\delta_1) = (\delta_1 - 6.1)/4{,}02 = 0{,}1 s_0(\delta_1)$.

В области $n = 0 \ldots n_\delta$ функции $F_1(n) \ldots F_2(n)$ практически полностью совпадают (см. рис. 4.3.4) и могут быть аппроксимированы простой функцией вида $M'(n) = \Omega n^\chi$, причем значения Ω и χ определяются из следующих очевидных условий:

$$M''(0{,}5) = 3\text{дБ},$$

и

$$M''(0{,}66) = 6{,}1\text{дБ}. \qquad (4.3.43)$$

Тогда получаем

$$M''(n) = 18n^{4{,}8}\ [\text{дБ}]. \qquad (4.3.44)$$

Нетрудно также получить выражение для $\bar{M}''$. Для этого перепишем условия (4.3.43) следующим образом:

$$\bar{M}''(0{,}5) = 2{,}1$$

$$\bar{M}''(0{,}66) = 4{,}1, \qquad (4.3.45)$$

и попытаемся представить выражения для $\bar{M}''$ в виде $M''(n) = 1 + \xi n^l$.

После несложных преобразований получаем $\xi = 17{,}2$; $l = 4{,}1$, т. е.

$$\bar{M}''(n) = 1 + 17{,}2n^{4{,}1}. \qquad (4.3.46)$$

Графики, представленные на рис. 4.3.5, позволяют оценить расходимость значений уровня на спадах основного лепестка, рассчитанных на основании точных формул для $F_1 \ldots F_3$, относительно их аппроксимации (4.3.44).

Таким образом, для синфазных апертурных антенн в дальней зоне в главных плоскостях представляется возможным достаточно просто определить M-функцию как зависимость относительного уровня поля от изменения нормированного к ширине диаграммы направленности по половинной мощности углового расстояния $n = \bar{\theta}/2\theta_{0,5}$.

Масштабная функция в децибелах выражается как

$$M(n)=\begin{cases} 18n^{1,4}, & 0\leqslant n\leqslant 0{,}66; \\ 6{,}1+(\lg n+0{,}18)\dfrac{\delta_1-6{,}1}{0{,}402}, & n>0{,}66; \end{cases} \tag{4.3.47}$$

в натуральных отношениях [из (4.3.42) и (4.3.46)]

$$\sqrt{F(n)}=\begin{cases} 1+17{,}2n^{4,1}, & 0\leqslant n\leqslant 0{,}66, \\ 4{,}08\,(1{,}52n)^{\frac{\delta_1-6{,}1}{4{,}02}}, & n>0{,}66. \end{cases} \tag{4.3.48}$$

Важным для последующего изложения является допущение (подтвержденное, как мы увидим далее, экспериментально), что зависимость $M(\delta_1)$ сохраняется для

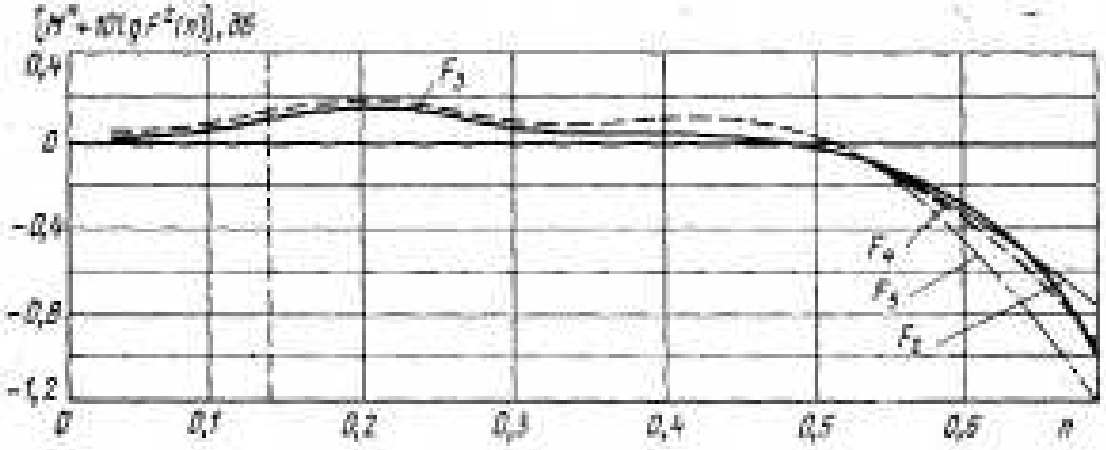


Рис. 4.3.5. Аппроксимация диаграмм направленности в области $n<0{,}66$.

значений δ_1, в общем не соответствующих исследованным функциям $F_1(n)$ ... $F_5(n)$. Графическое решение M-функции для целых значений δ_1 в области $n=0$ ... 10 (когда влиянием конструктивных элементов антенн, например тяг, практически можно пренебречь) приведено на рис. 4.3.6 (для целых значений δ_1 в дБ).

4.3.3. Ближнее боковое поле. Найденные закономерности распределения поля антенн, использованные для вывода расчетных формул, проявляются, строго говоря, только в дальней зоне, где антенну можно принять за точку, а диаграмму направленности можно считать сформированной.

Для решения задачи ближнего поля воспользуемся некоторыми закономерностями в формировании «даль-

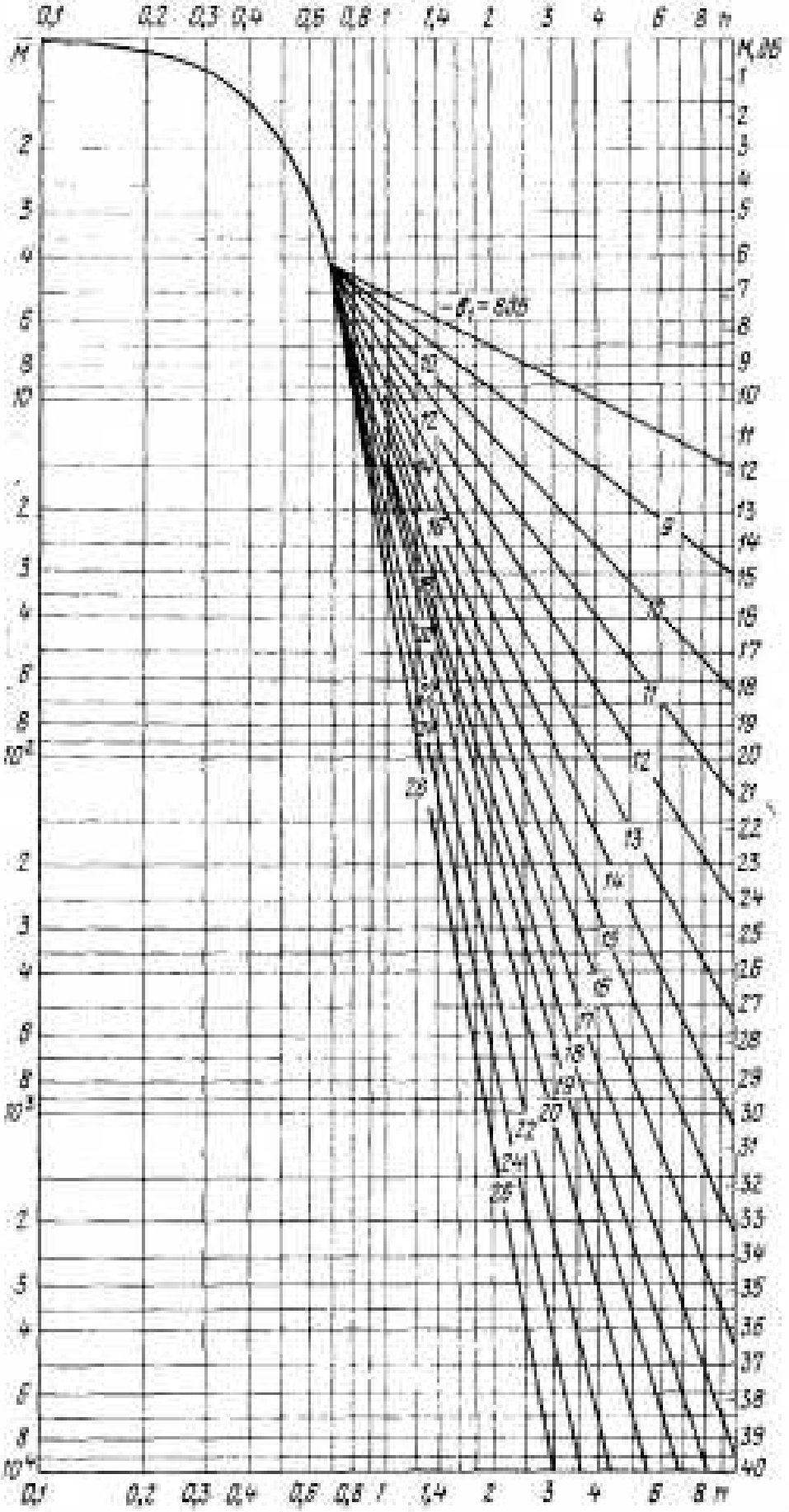


Рис. 4.3.6. Графическое решение M-функции.

них» диаграмм, выявленными выше. Для этого исследуем равенство

$$<F(\theta, x)>=\text{const}(x) \pm \delta<F(\theta, x)>, \quad (4.3.49)$$

где $F(\theta, x)$ — диаграмма излучения антенны на расстоянии $x \leqslant 1$, отсчитываемая относительно электрической оси антенны в углах θ с вершиной в точке C (рис. 4.3.7); $\delta<F(\theta, x)>=<F(\theta, x)>-<F(\theta, 1)>$.

Очевидно, равенство (4.3.49) соблюдается в пределах передней полусферы для любых (x', θ'), если выбор C произволен. Предположим, что существует точка C, относительно которой огибающие диаграмм излучения в заданном диапазоне углов и расстояний подобны.

Предварительное рассмотрение результатов расчетов поля в зоне Френеля, приведенных в работе Р. К. Хансена [141], позволяет сделать вывод, что если задаться некоторой дополнительной ошибкой (в пределах допустимых практически), то такая точка, по крайней мере в главных плоскостях антенн квазиоптического типа, существует и находится на продолжении электрической оси за антенной; ее единственная координата определяется в основном размерами апертуры и шириной формируемой ею диаграммы направленности. Подробные расчеты показали, что координата указанной точки для синфазных апертурных антенн является достаточно стабильной, т. е. можно ввести новое понятие — «мнимый амплитудный центр» (или МАЦ). Как мы увидим ниже, *введение понятия мнимого амплитудного центра во многом упрощает расчет поля антенн*, так как позволяет использовать в зоне Френеля найденные закономерности формирования дальнего поля антенн и разработать фактически единую методику расчета бокового поля антенн на всех реальных расстояниях от апертуры.

В идеале, МАЦ есть точка, относительно которой с точностью до огибающей диаграммы излучения на дальних и ближних расстояниях подобны.

Понятие амплитудного центра антенны в некотором смысле аналогично понятию фазового центра, введенного А. Р. Вольпертом в 1941 г. Действительно, согласно определению фазового центра [54], это — точка, относительно которой фазовые диаграммы направленности на любых расстояниях представляют собой подобные фигуры (концентрические окружности). Огибающие амплитудных диаграмм направленности, снятые относительно мнимого амплитудного центра, как явствует из самого определения МАЦ, также подобны. Однако следует заметить, что эта аналогия чисто внешняя; во вся-

кой случае, существование или отсутствие у антенны фазового центра вовсе не предполагает обязательного существования или отсутствия амплитудного.

Итак, постулировав существование МАЦ, можно определить его местоположение на основании материала по распределению поля антенн в необходимом диапазоне углов и расстояний, приведенных, в частности, в § 4.2. Вообще говоря, для определения зависимости $x_{а\,ц}(\theta, x)$ можно воспользоваться общими выражениями для $F(\theta, x)$, например типа (4.2.15) или (4.2.16).

Эти уравнения неявно содержат координату $x_{а\,ц}$ точки C на оси антенны (рис. 4.3.7), такую, что для произ-

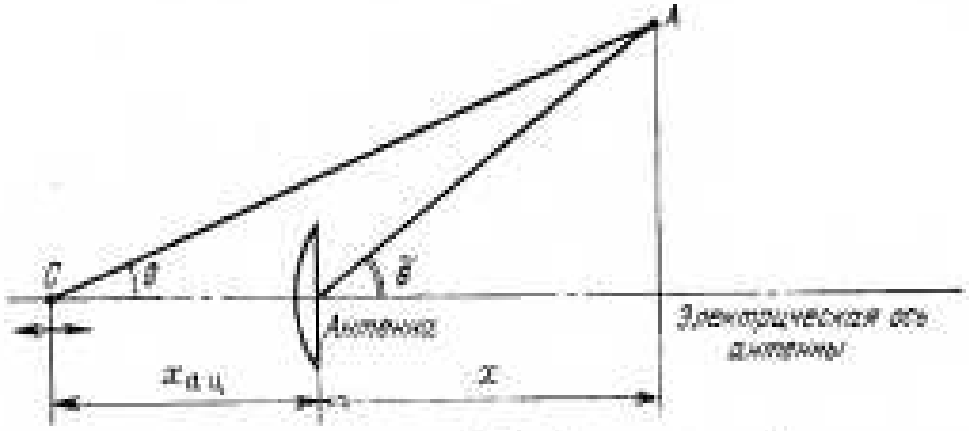


Рис. 4.3.7. Соотношение углов $\bar{\theta}$ и θ для точки A при определении положения мнимого амплитудного центра.

вольной точки A при отсчете угла θ относительно электрической оси антенны при заданных ошибках, углах или расстояниях выдерживается равенство (4.3.49).

Однако получение подобной зависимости аналитически сопряжено с большими трудностями математического порядка, поэтому имеет смысл для нахождения текущих координат $x_{а\,ц}$ точек C воспользоваться готовыми результатами расчета, приведенными в работе [181] и в § 4.2 в форме графиков зависимости уровня бокового поля от угла θ для различных $x = R\lambda/8a^2 \approx R\theta_{0,5}/2a$ (начало координат при отсчете угла θ выбрано здесь в физическом центре апертуры).

Исследуем погрешности расчета бокового поля при допущении $x_{а\,ц}$ постоянным по крайней мере в заданном диапазоне углов некоторого класса антенн: $x_{а\,ц} = \text{const}$ (θ, δ_1). Для этого, исходя из геометрических соображе-

ний (рис. 4.3.8), запишем (учитывая малость углов)

$$\theta = \frac{\bar{\theta}}{1 + x_{\text{в.ц}}/x} \qquad (4.3.50)$$

и определим

$$\nu = M(n) - \langle M^*(n) \rangle, \qquad (4.3.51)$$

где ν — единичная погрешность, или расходимость (см. ниже) расчета ближнего поля при заданном $x_{\text{в.ц}}$; $M(n)$ — значение M-функции, определяемое для заданных

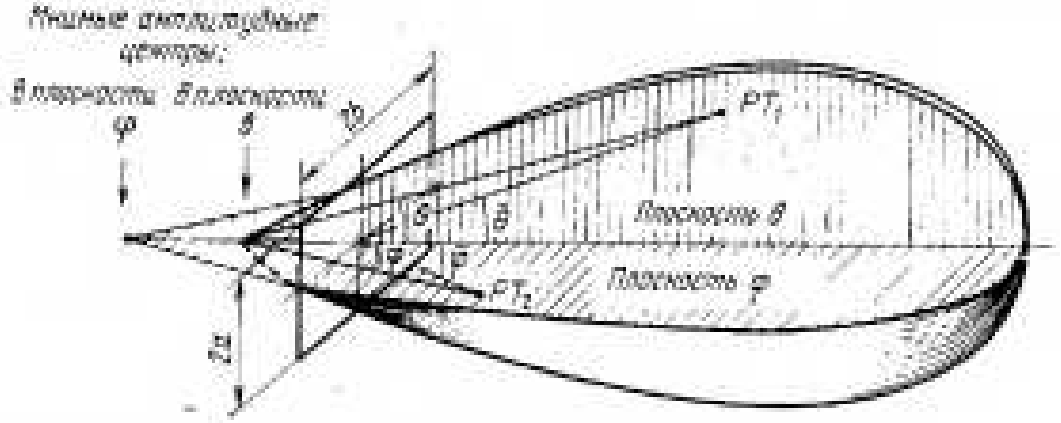


Рис. 4.3.8. Отсчет углов θ, $\bar{\theta}$, φ, $\bar{\varphi}$ после введения минимого амплитудного центра в обеих главных плоскостях:
PT_1 — расчетная точка в вертикальной плоскости θ, PT_2 — расчетная точка в горизонтальной плоскости φ; $2a$, $2b$ — размеры апертуры соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях

$\bar{\theta}$ по формулам (4.3.47); $M^*(n)$ — относительное значение уровня ближнего поля, полученное из точных выражений или графиков; ν, M — в децибелах.

На рис. 4.3.9 данные расчета $\nu(x, x_{\text{в.ц}})$ для $ka = 2a/\lambda = 5$, 10, 20, 50, 100, 200 и 500 сгруппированы по максимальным и средним (за одно значение ka) значениям. В каждом кадре приведены все $x_{\text{в.ц}}$, оптимальные для одного значения ka («локальные» $x_{\text{в.ц}}$) и за весь кадр.

Итак, *единственной особенностью расчета ближнего поля является необходимость при определении координат расчетной точки принимать во внимание смещение вершины угла* θ *из центра антенны за ее апертуру на расстояние* $x_{\text{в.ц}}(x)$. В простейшем случае можно принять $x_{\text{в.ц}} = \text{const}(x) = 0{,}1$, но в этом случае при $R \approx 0{,}01 \ldots 0{,}04$ будет некоторое занижение результатов расчета. Для повышения точности расчета следует учитывать характер зависимости $x_{\text{в.ц}}(x)$, видный из рис. 4.3.9.

4.3.4. Применимость методов расчета. Можно выделить следующие граничные условия применимости любых методов расчета поля антенн.

1. Необходимые исходные данные, которые можно оценить по материалам § 4.2 и 4.3.

2. Область расчетных значений основных параметров, т. е. диапазон разрешенных углов и минимальные расстояния, в пределах которых выдерживается заданная точность. Диапазон углов и расстояний для апертурного метода и метода краевых волн определены выше (в § 4.2); для Р-метода диапазон разрешенных углов определяется раздельно двумя параметрами: $n \leqslant 10 \ldots 20$ и $\theta \leqslant 30 \ldots 60°$ (вне этих значений n и θ расчет становится фактически невозможным). Диапазон разрешенных углов определяется необходимой точностью расчета ± 6 дБ. Для Р-метода понятие минимального расстояния для расчета осевого поля не имеет смысла, так как расчет может вестись от самой апертуры; для бокового оно определено минимальным расстоянием, на котором удалось провести сравнение с апертурным методом: $x = 0{,}012$.

3. Соответствие величин точности расчета, гарантируемой методом и требуемой практикой (в пределах разрешенных углов и расстояний). Как известно, для апертурного метода точность расчета поля определена как ± 5 дБ, а для метода краевых волн 6 ... 8 дБ [66].

Оценка точности расчета Р-методом проведена на основании имеющегося экспериментального материала и сравнением с другими методами. Типичные графики сравнения данных расчета Р-методом с экспериментальными для осевого поля приведены на рис. 4.3.10, для бокового поля — на рис. 4.3.11 и 4.3.12. На последних рисунках ν — отношение расчетных значений к экспериментальным в децибелах. Антенна излучателя прямоугольная, поэтому сравнение получено в очень широком диапазоне относительных расстояний x от 0,024 до 24. Результаты сравнения нанесены на графике в виде точек в координатах R—ν. Заштрихованная полоса ограничивает 80% результатов каждого знака. Зависимость $\nu(n)$ приведена для каждого дискретного расстояния $x_{a,b}$ и R.

Сравнение расчетов по апертурному и Р-методу, проведенное в соответствии со схемой проверки табл. 4.3.2, можно наблюдать на рис. 4.3.9, в табл. 4.3.3, а также на рис. 4.3.13 — 4.3.16.

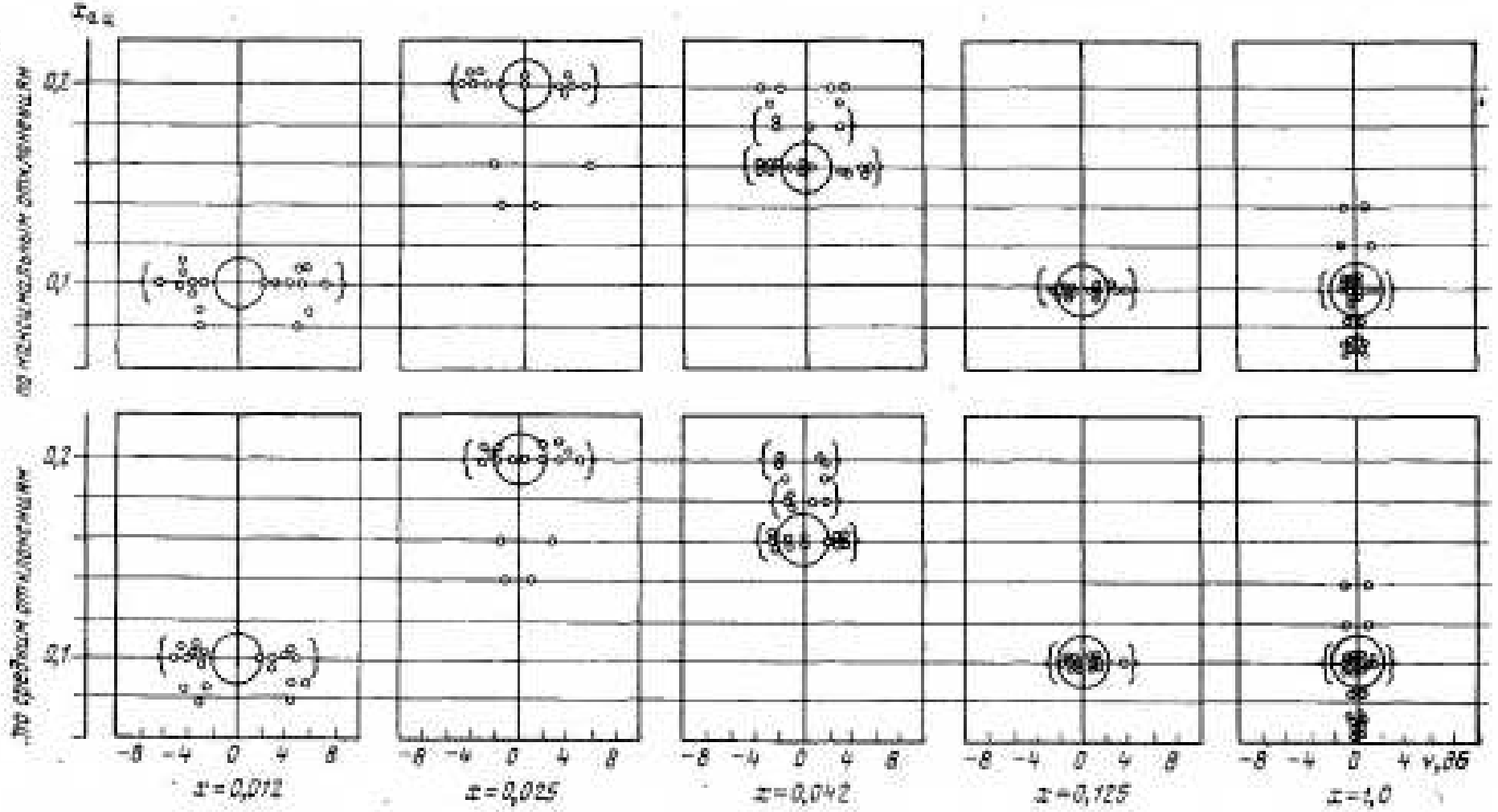


Рис. 4.3.9. Результаты сравнения расчета огибающих поля апертурных антенн с синфазным равномерным возбуждением апертурным и Р-методом для оптимальных и выбранных $x_{а.н}$:
ν — расходимость расчетов; маленькие кружки — $x_{а.н}$ оптимальные в каждый акт сравнения; в центре больших кругов находятся $x_{а.н}$, выбранные для практических расчетов.

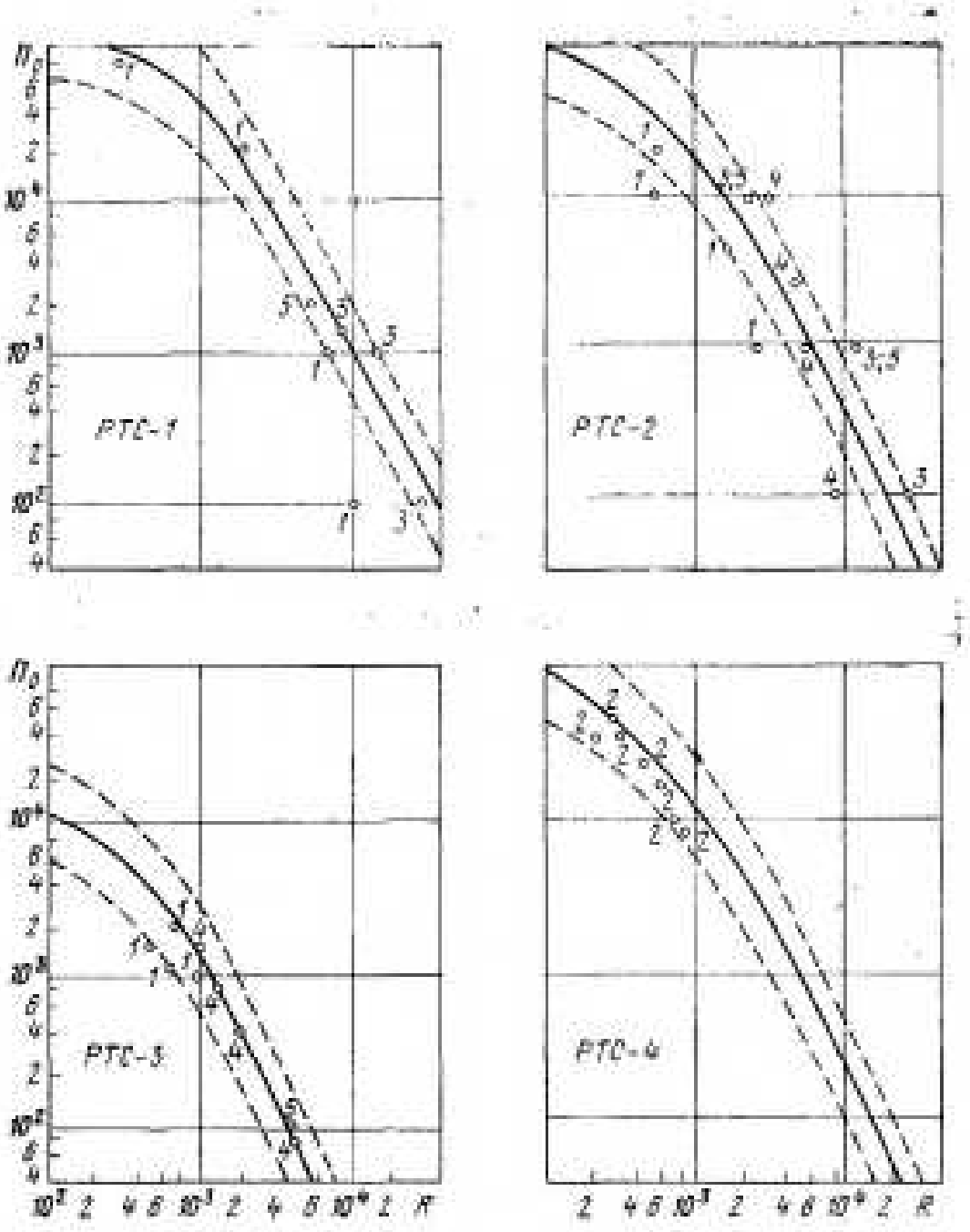
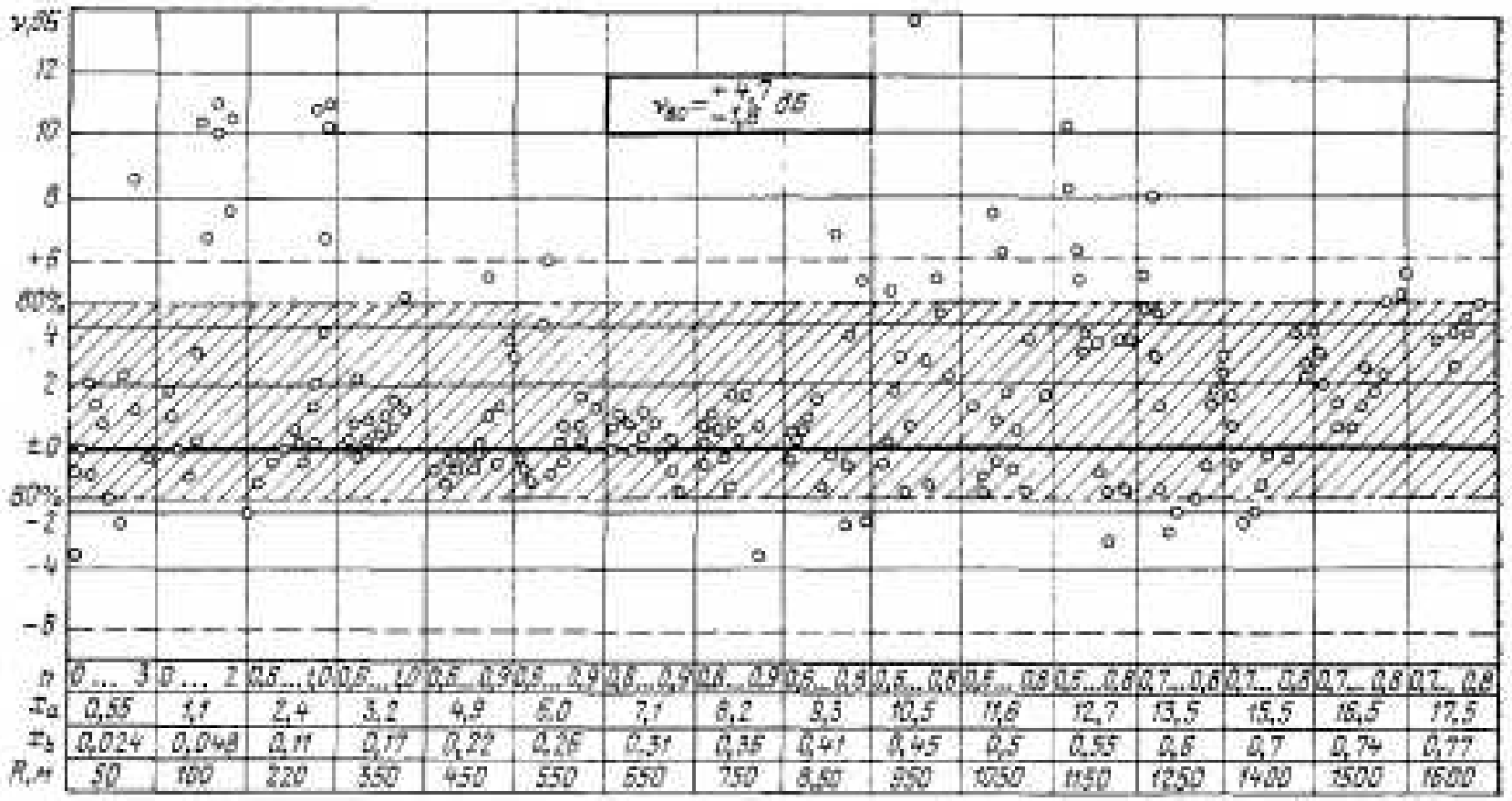


Рис. 4.3.10. Экспериментальные (кружочки) и расчетные значения ППМ некоторых РТС (в мкВт/см^2), по данным разных авторов.

Точность расчета Р-методом на основании полученных выше данных сравнения оказалась равной ±3 дБ для осевого поля и около ±6 дБ для бокового; несколько лучшие результаты дает сравнение расчета поля апертурным [187] и Р-методом антенных решеток (рис. 4.3.17), но в последнем случае необходим дополнительный учет интерференционных максимумов (см. стр. 33).



n	0 ... 3	0 ... 2	0,5...1,0	0,6...1,0	0,6...0,9	0,6...0,9	0,6...0,9	0,6...0,9	0,6...0,9	0,6...0,8	0,6...0,8	0,6...0,8	0,7...0,8	0,7...0,8	0,7...0,8	0,7...0,8
x_a	0,55	1,1	2,4	3,2	4,9	5,0	7,1	6,2	8,3	10,5	11,6	12,7	13,5	15,5	16,5	17,5
x_b	0,024	0,048	0,11	0,17	0,22	0,26	0,31	0,35	0,41	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,74	0,77
R,м	50	100	220	350	450	550	650	750	8,50	950	1050	1150	1250	1400	1500	1600

Рис. 4.3.11. Зависимость отношения ν расчетных ППМ к экспериментальным от расстояния и приведенного угла для РЛС со следующими параметрами: $a/b=0{,}31$; $p/ab=34$ мВт/см^2; $2a/\theta_{0,5}=2100$ м; $\delta_1=-22$ дБ; $\varepsilon/2\theta_{0,5}=+0{,}65$.

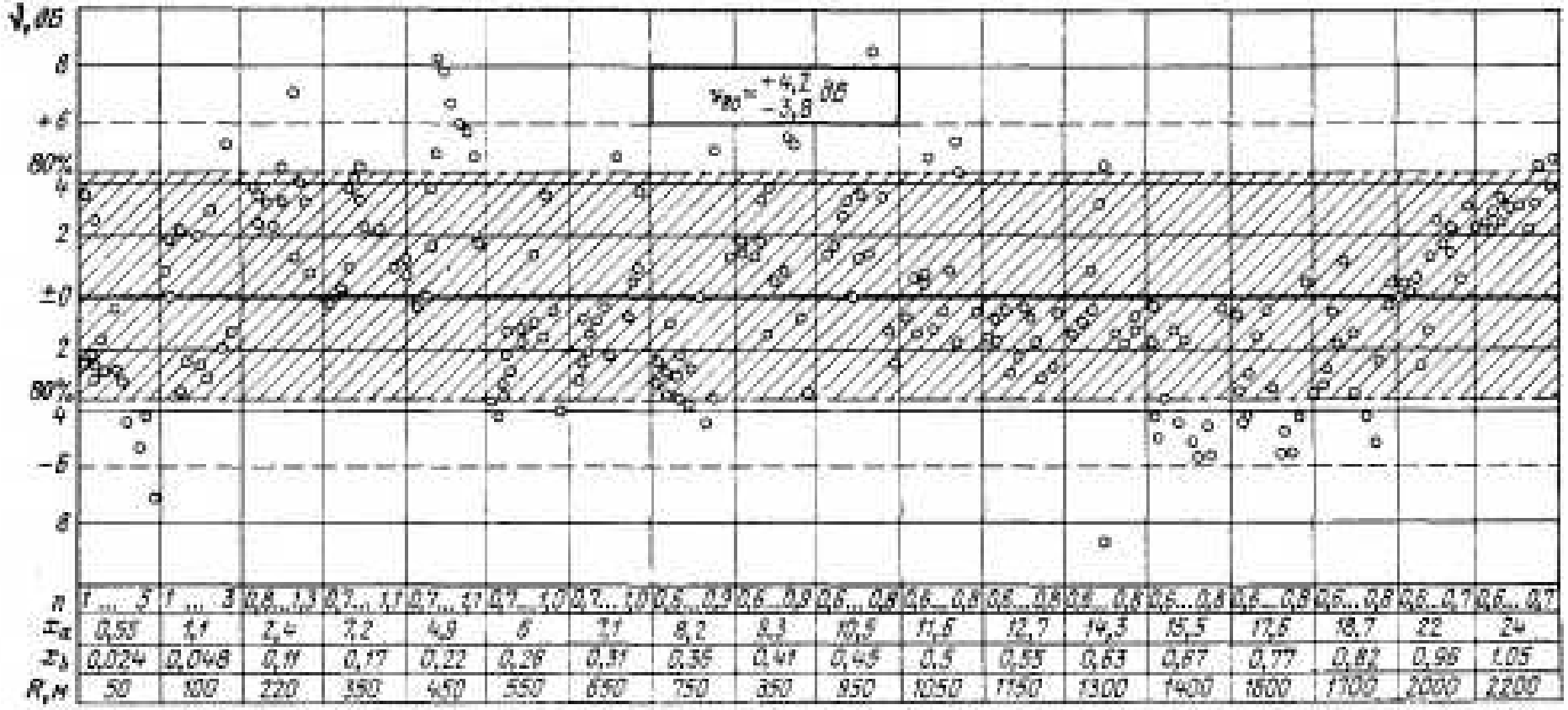


Рис. 4.3.12. Зависимость отношения ν расчетных ППМ к экспериментальным от расстояния и приведенного угла для той же РЛС, что и на рис. 4.3.11, $\varepsilon/\theta_{0,5}=+0,55$.

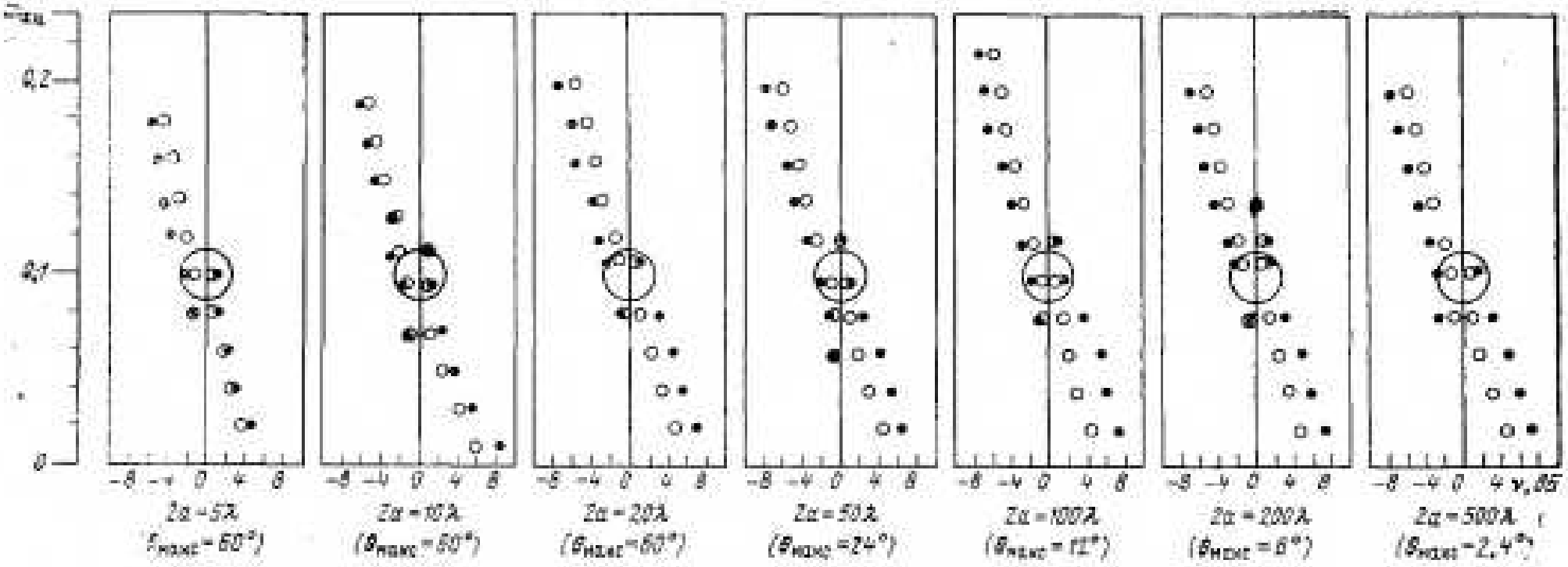


Рис. 4.3.13. Результаты сравнения расчета огибающих поля апертурных антенн с синфазным равномерным возбуждением ретроспективным и апертурным методами для $x=0{,}125$, $n=0\ldots20$; расходимость: максимальная $v_{макс}$ — ○○○, средняя $v_{ср}$ —●●●

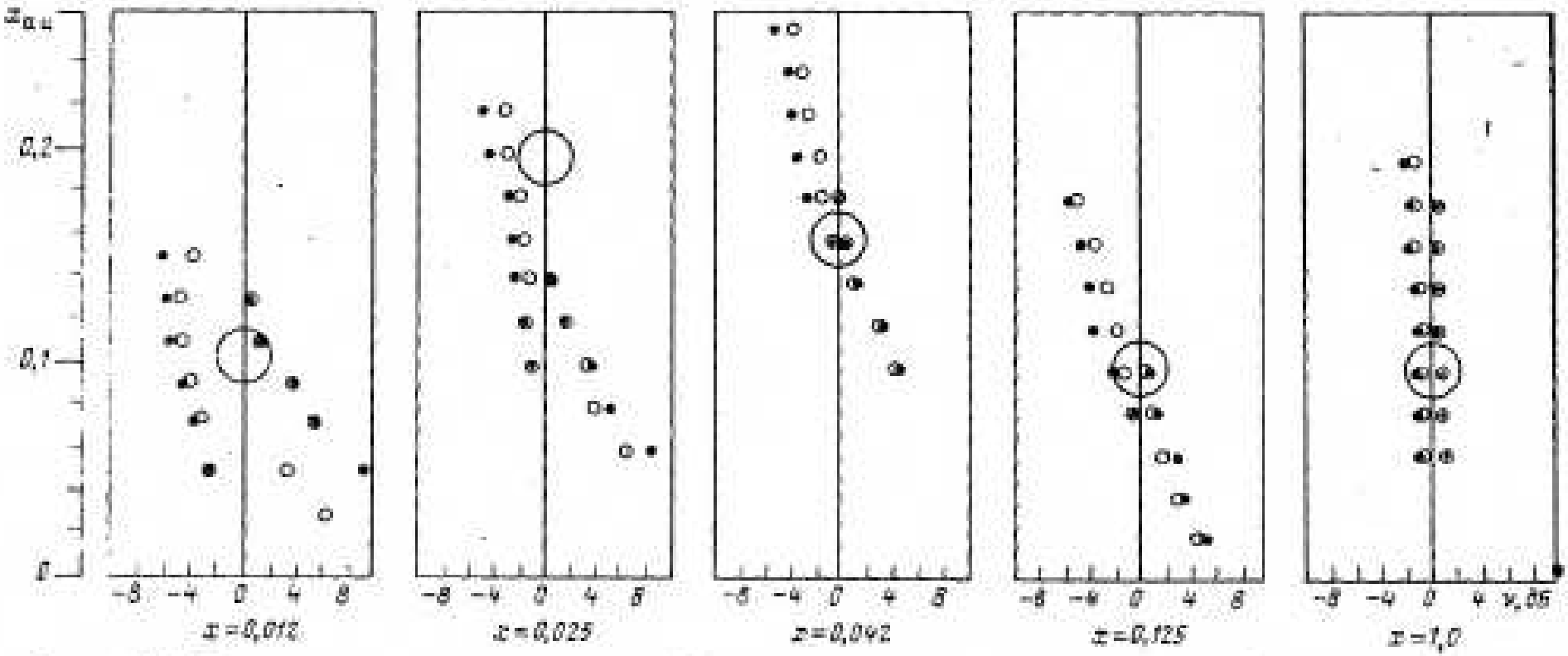


Рис. 4.3.14. Результаты сравнения расчета огибающих поля апертурных антенн с синфазным равномерным возбуждением Р-методом и по формулам апертурного метода для $2a=5\lambda$; $n=0\ldots5$ ($\theta=0\ldots60^\circ$). Обозначения $v_{макс}$ и $v_{ср}$, как и на предыдущем рисунке.

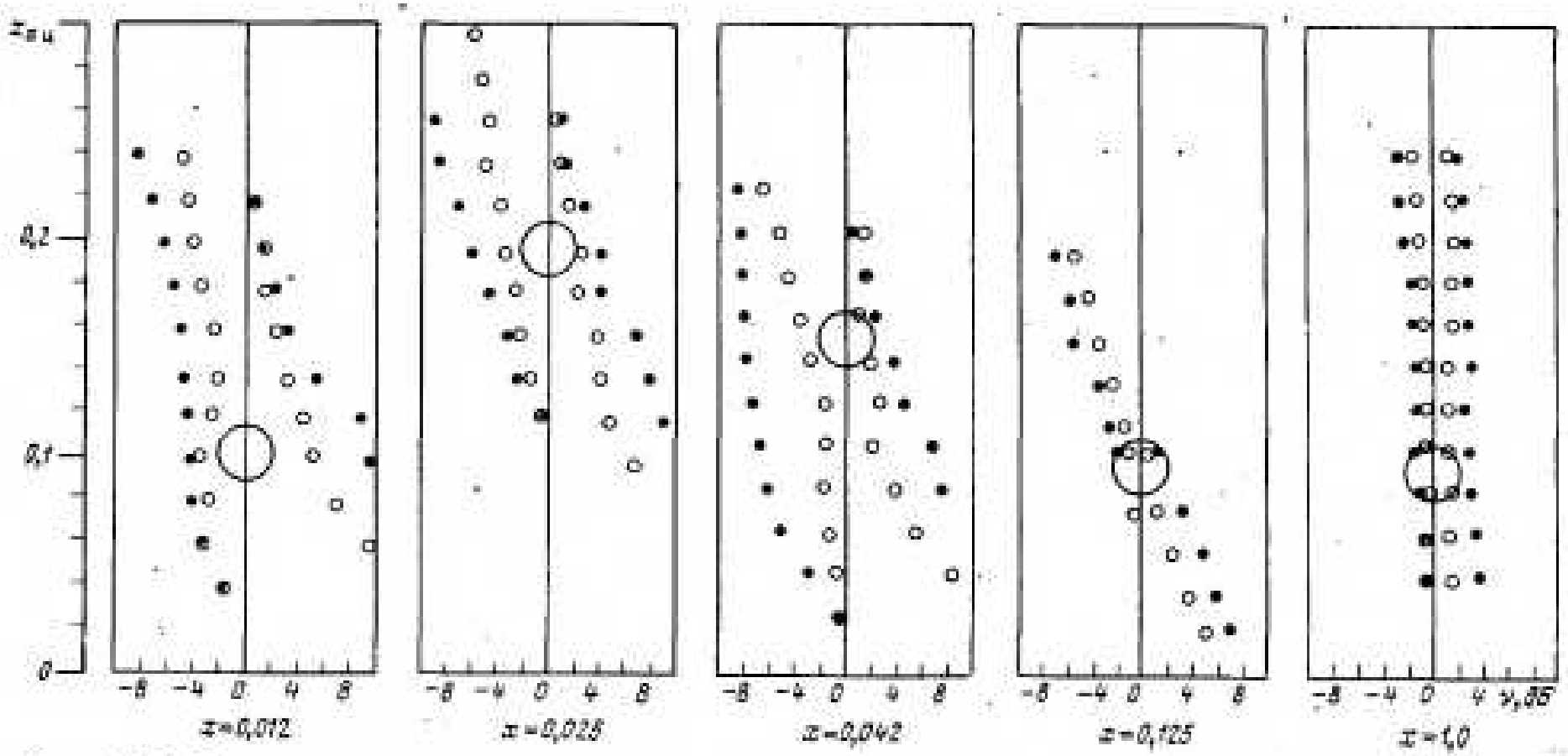


Рис. 4.3.15. Результаты сравнения расчета огибающих поля апертурных антенн с синфазным равномерным возбуждением Р-методом и по формулам апертурного метода для $2a=20\lambda$; $n=0\ldots20$ ($\theta=0\ldots60°$). Обозначения $\gamma_{макс}$ и $\gamma_{ор}$ соответственно рис. 4.3.13.

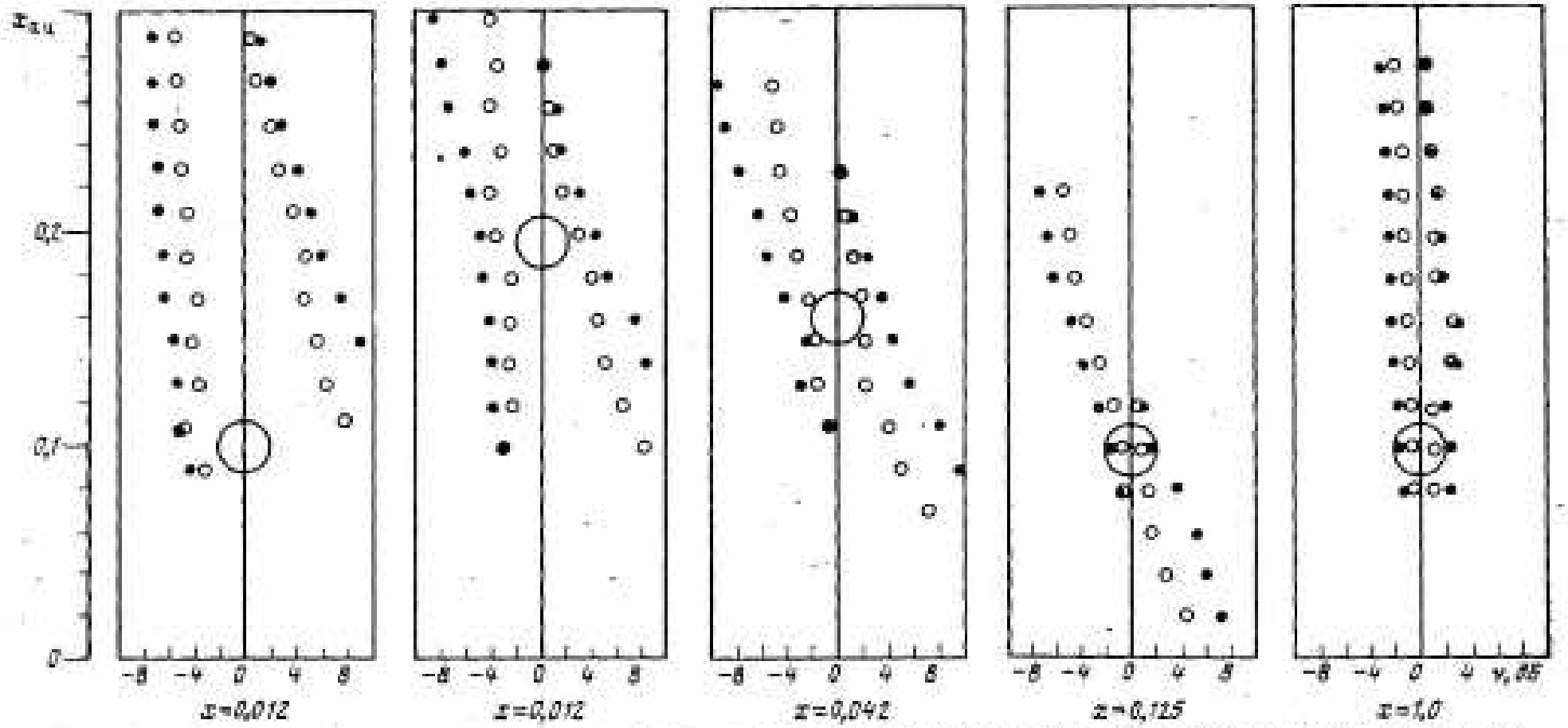


Рис. 4.3.16. Результаты сравнения расчета отбивающих поля апертурных антенн с синфазным равномерным возбуждением ретроспективным и апертурным методами для $2a=100\lambda$; $n=0\ldots20$ ($\theta=0\ldots12°$). Обозначения $v_{\text{макс}}$ и $v_{\text{ср}}$ как и на рис. 4.3.13.

Таблица 4.3.2

Максимально разрешенный расчетный угол, а также значения x и $2a/\lambda$, для которых проведен расчет при $n_{макс}=10$ (+) и $n_{макс}=20$ (О)

Размер апертуры a длинах волн $2a/\lambda$	Максимальный расчетный угол $\theta'_{макс}$ при		Приведенное расстояние x				
	$n_{макс}=10$	$n_{макс}=20$	0,012	0,035	0,042	0,125	1
5	60	60	+	+	+	+О	+
10	60	60	+	+	+	+О	+
20	30	60	+О	+О	+О	+О	+О
50	12	24	+	+	+	+О	+
100	6	12	+О	+О	+О	+О	+О
200	3	6	+	+	+	+О	+
500	1,2	2,4	+	+	+	+О	+

4. Простота расчета и необходимое расчетное время; необходимость и степень сложности дополнительной обработки. И то, и другое оценено при сравнении расчета рассматриваемыми методами вертикальной диаграммы излучения (ВДИ, см. § 4.1 и 5.1).

5. Возможность сведения результатов к форме, удобной для использования. Сейчас можно считать принятым использовать результаты расчета в форме ВДИ. Расчет ВДИ Р-методом рассмотрен ниже (в гл. 5). Традиционными методами этот расчет без дополнительной достаточно сложной обработки провести не удается.

6. Возможность ввода коррекции на основании экспериментальных данных. Ввод коррекции в процессе расчета поля Р-методом в большинстве случаев осуществляется подбором только одной величины — уровня первого бокового лепестка δ_1. Для апертурного метода и метода краевых волн этот процесс оказывается весьма сложным, поэтому часто он практически неосуществим;

7. Практическая необходимость ограничений по расчету полей, формируемых специальными распределениями по апертуре. Одним из важных достоинств апертурного метода является возможность расчета поля синфазных апертур, имеющих самые различные распределения. До сих пор лишь немногие из рассчитанных случаев использовались практически, однако с внедрением в антенную технику фазированных решеток значение этих исследований повышается. Ретроспективный

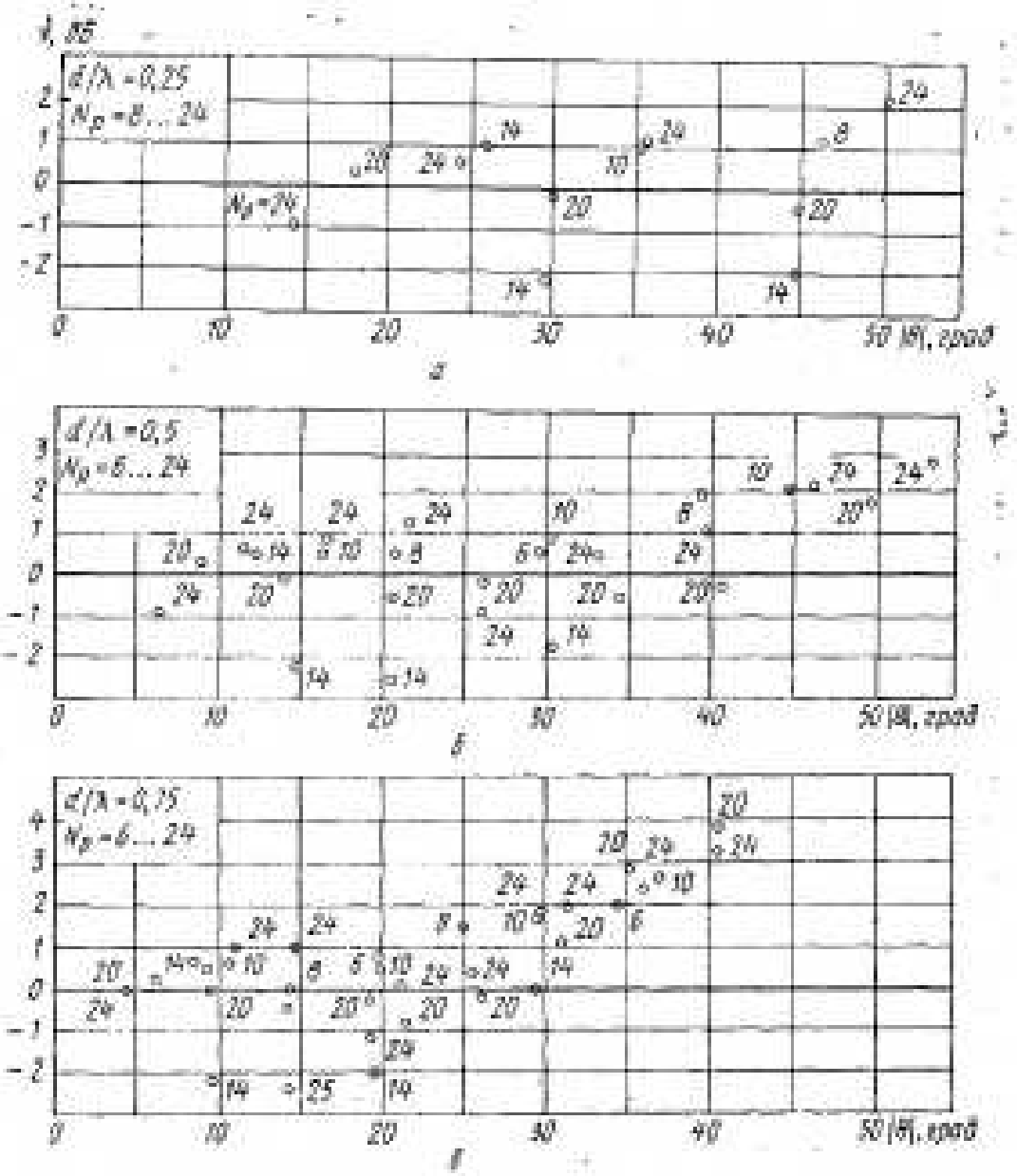


Рис. 4.3.17. Погрешность Р-метода при расчете огибающих поля равномерно возбужденных антенных решеток.

Положение точек по оси $\overline{\theta}$ определяется угловым положением боковых лепестков на диаграммах, соответствующих каждой N_p. N_p — число элементов в решетке, d/λ — расстояние между элементами в длинах волн.

метод, несомненно, имеет более узкое применение, но все же следует отметить, что большинство практически встречающихся случаев им описывается вполне удовлетворительно. Ограничения по расчету Р-методом поля апертур, имеющих распределения типа (4.2.8) и (4.2.10), можно оценить по количеству пар $(\bar{n}, \bar{a})$, для которых точность расчета не выходит за пределы гарантируемой.

Некоторые сведения по оценке применимости расчетных методов в практике радиогигиены приведены в табл. 4.3.4.

Таблица 4.3.3

Результаты сравнения апертурного и ретроспективного методов по расчету поля круглой апертуры и линейного источника (в дБ по отношению к расчетным значениям, полученным апертурным методом)

$\bar{a}^2$	Линейный источник						Круглый раскрыв					
	$\bar{a}$											
	1		2		3		1		2		3	
	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$	$\gamma_{ср}$	$\gamma_{кв}$
1	+4,60 −1,5	+7,0 −2,0					+3,2 −3,5	+3,0 −5,0				
0,447	+4,7 −1	+6,8 −1	+5,6 −1,8	+8 −3	+0,7 −2,9	+1 −5	0 −4,0	0 −4,5	+4,4 −1,5	+6,5 −2	+4,8 0	+6 0
0,316	+1,9 −1,3	+2 −1	+4,09 −2	+7 −2	+6,5 0	+9,5 0	+2,6 −1,4	+4 −1,5	+2,7 −2,8	+3 −3	Р-методом не рассчитывается	
0,178	0 −2,50	0 −4,8	+4,7 −1,9	+6 −3,0	+1,6 −3,6	+3 −5,5	+1,5 −2,73	+2 −4	+5,9 0	+7 0	+3,7 −1,6	+5 −2
0,1	+0,72 −1,7	+2 −3	Р-методом не рассчитывается Р-методом не рассчитывается				+0,9 −2,8	+2 −5	Р-методом не рассчитывается Р-методом не рассчитывается			
0,0562	+1,4 −1,5	+2 −1,5	+4,7 −2,5	+7 −3	Р-методом не рассчитывается		+1,3 −3,6	+2 −5	+1,7 −2	+3 −3	+3,7 −3,6	+4 −4
0	+1,1 −1,4	+6 −2	+2,1 −2,9	+3 −5	+1 −6,1	+1 −6	+1 −4,9	−2 −8	+0,66 −5,4	+0,66 −6	Р-методом не рассчитывается	

Таблица 4.3-4

Оценка применимости методов для расчета полей синфазных апертур

Условия	Апертурный метод	Метод кривых волн	Ретроспективный метод
Необходимые исходные данные	P, $2a$, $2b$, G, $\widetilde{n}$, $\widetilde{\varkappa}$, λ	P, $2a$ ($2b$), $\widetilde{n}$, $\widetilde{\varkappa}$, $\Phi_{\text{кр}}$, λ	P, $2a$, $2b$, $2\theta_{0,5}$, $2\varphi_{0,5}$, δ_1
Область расчетных значений основных параметров: —по углам	$\theta \approx \pm \arcsin \frac{5\pi}{ka} = \pm \arcsin \frac{5\lambda}{2a}$	$\theta \approx \pm \left(\arcsin \frac{5\pi}{ka} \dots \pi \right)$	$\overline{\theta} = \pm (0 \dots 20) \cdot 2\theta_{0,5} \leqslant 60°$
—по минимальному расстоянию	$x_{\text{мин}} = 0{,}03 \dots 0{,}075$	$R_{\text{мин}} = 2a$ (или $2b$)	$x_{\text{мин}} = 0{,}012 \dots 0{,}025$
Гарантируемая точность в пределах разрешенных углов и расстояний: —по осевому полю —по боковому полю	± 3 дБ ± 5 дБ	— не оговаривается	± 3 дБ, ± 6 дБ } в 80% случаев
Естественный способ оформления расчетных данных	графики $\Pi(R, \theta)$	ППМ в точке; графики $\Pi(R, \theta)$	ППМ в точке, графики $\Pi(R, \Delta, \varepsilon)$ — ВДН

Продолжение табл. 4.3.4

Условия	Апертурный метод	Метод краевых волн	Ретроспективный метод
а) Необходимое расчетное время для построения ВДИ (всего 150 точек): —на ЭВМ —на КВМ с использованием графиков, —на КВМ без использования графиков	12,5 ч* 12 ч Не целесообразно		7 мин 8 ч 30 ч
б) Необходимость в дополнительной обработке	обязательна	обязательна	не требуется
Исходные данные, изменяемые при вводе коррекции	$\tilde{\alpha}$, $\tilde{n}$, G, δ_1, $n_{1,2}$	$\tilde{\alpha}$, $\tilde{n}$	δ_1
Количество пар $[\tilde{n}, \tilde{\alpha}]$ ($\tilde{n}$=0,1, 2,3 и $\tilde{\alpha}$=0, 0,0562; 0,1; 0,178; 0,316; 0,447; 1,0), при которых поле поддается расчету	38	38	31

* При определении необходимого времени принято, что при расчете одной ВДИ расчетное время распределяется между апертурным методом и методом краевых волн поровну, при этом в приведенное значение времени не вошло время на процесс ручной интерполяции.

Рассмотренные в этой главе методы расчета поля в значительной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к ним при использовании в практике радиогигиены. При выборе в том или ином случае конкретного метода приходится учитывать необходимую точность расчета, имеющиеся исходные данные и возможности математического обеспечения, определяющие в основном необходимость и допустимость применения того или иного метода.

Расчет поля одним из методов, рассмотренным выше, является *первым* этапом системы последовательного контроля радиобезопасности в зоне действия антенных излучателей. *Второй* этап включает в себя учет влияния местности на трассе распространения радиоволн и вблизи расчетной точки. С точки зрения обеспечения необходимой точности радиопрогноза этот этап является не менее важным, чем расчет поля в свободном пространстве, хотя и менее разработанным. В следующей главе рассмотрены практические вопросы расчета поля в свободном пространстве, некоторые рекомендации по учету влияния земли и местных предметов, а также сделан обзор методов учета влияния прерывистости поля при облучении пространства полем антенн с перемещающимися диаграммами излучения.

5. ОСНОВЫ И ПРАКТИКА РАДИОПРОГНОЗА

Особенностью Р-метода является возможность упрощения процесса построения вертикальной диаграммы излучения (см. § 4.1). ВДИ может быть рассчитана с помощью номограмм, упрощенных формул, на клавишно-вычислительных машинах (КВМ) и полных формул на ЭВМ. Кроме того, этот метод позволяет легко вводить коррекцию в расчет на основании результатов измерений, если они статистически достоверны и свободны от влияния условий распространения и распределения энергии.

Не всегда радиопрогноз можно осуществить расчетными методами; например при наличии косеканс-квадратных диаграмм полей разреженных решеток приходится обходиться только самыми общими рекомендациями.

Учет влияния трассы и местных предметов в огромном большинстве случаев дает ощутимую поправку к результатам, полученным методами расчета поля в свободном пространстве. Поэтому целесообразно повторить некоторые практические советы по использованию принципов учета влияния земли, уже известных в специальной инженерной и научной литературе, а также привести некоторые результаты собственных исследований.

Будут рассмотрены также некоторые частные случаи расчета временных характеристик поля на основании Р-метода и геометрических представлений о формировании поля апертурных антенн.

5.1. ПРОГНОЗ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛЯ В СВОБОДНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Несмотря на то, что этому вопросу была посвящена фактически вся гл. 4, для решения некоторых практических вопросов (построение ВДИ, ввод коррекции в расчет и др.) недостаточно прямого использования полученных в ней формул. Во многих случаях, как мы увидим, для решения практических вопросов могут быть применены основные соотношения, полученные Р-методом. В некоторых случаях, однако, должны быть использованы более сложные зависимости.

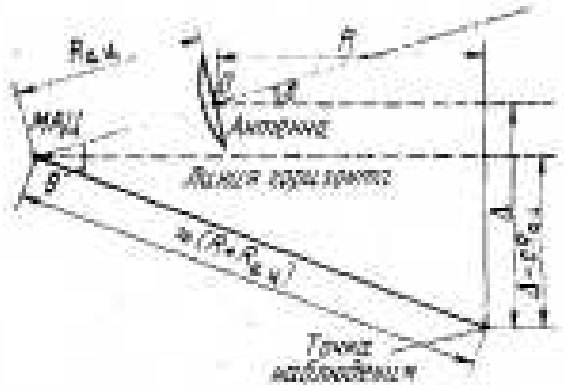


Рис. 5.1.1. К расчету координат точки наблюдения (расчетной точки).

5.1.1. Вертикальная диаграмма излучения. Одним из самых простых и надежных способов оформления расчетных данных является вертикальная диаграмма излучения. ВДИ представляет собой семейство линий равных ППМ (изоплотностей), нанесенных в координатах расстояние — превышение, точнее: горизонтальная дальность R между точкой наблюдения и центром апертуры антенны — вертикальное превышение Δ центра антенны над расчетной точкой (рис. 5.1.1). В этих же координатах удобно строить и линии равных скважностей воздей-

ствия поля РТС с периодическим перемещением диаграмм (изоскважностей).

Обычный вид ВДИ приведен на рис. 5.1.2. Для построения ВДИ используется координатная сетка в двух масштабах. Основной масштаб выбирается линейным в пределах $R=0 \ldots 1000$ м и $\Delta=0 \ldots 100$ м. Кроме основной картины на малых расстояниях, на этой же карте для расширения пределов внизу строится дополнительная сетка в масштабе 1 : 10 к основной. Справа нанесена шкала углов, необходимая для отсчета угла

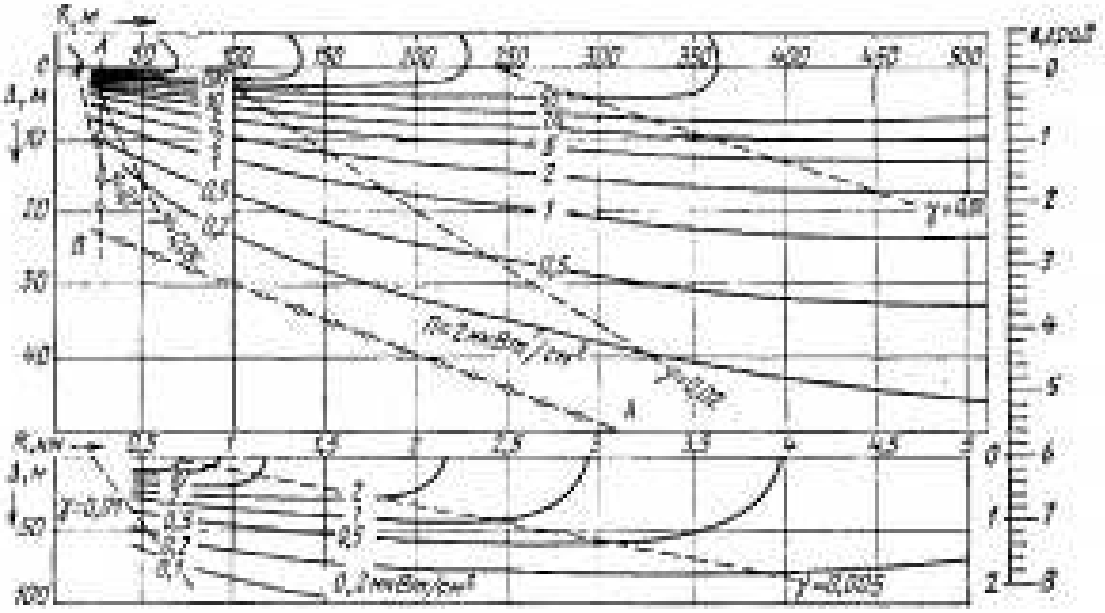


Рис. 5.1.2. Общий вид вертикальной диаграммы излучения станции (*АВА* — граница зоны разрешения по расстоянию и углу; γ — скважность, см. § 5.3).

места ε и используемая при ручном счете для построения карты.

Оформление результатов расчета в виде ВДИ позволяет свести к минимуму операции по определению зависимости интенсивности поля от координат точки наблюдения и угла наклона антенны, упрощает расчет влияния рельефа и т. п.

После введения понятия мнимого амплитудного центра (п. 4.3.3) ближнее боковое поле оказалось довольно просто рассчитать, сместив начало отсчета координат из центра антенны за ее апертуру на величину $R_{\text{з.ц}}$; приведенный угол точки наблюдения оказывается равным $n=\theta/2\theta_{0,5}$. На практике вместо угла θ намного

удобнее пользоваться значением расстояния R^* и превышения Δ (рис. 5.1.1). Тогда соотношение (4.3.26) перепишется так:

$$n = \frac{1}{2\theta_{0,5}} \left(\frac{\Delta + \varepsilon R}{R + R_{\text{э ц}}} \right) \qquad (5.1.1\text{а})$$

при $n \approx 1$ и

$$n = \frac{1}{2\theta_{0,5}} \operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta + \varepsilon R}{R + R_{\text{э ц}}} \right) \qquad (5.1.1\text{б})$$

при $n \gg 1$. Вследствие малости углов наклона ε здесь принято, что $\sin \varepsilon \approx \varepsilon$.

Для построения ВДИ решим относительно Δ уравнения для $\overline{M}$ (4.3.48), $R_{\text{э ц}}$ и n (5.1.1) при $\varepsilon = 0$. После несложных преобразований получаем

$$\Delta = \begin{cases} \dfrac{2\theta_{0,5}}{57,3} (R + R_{\text{э ц}}) \left(\dfrac{\overline{M} - 1}{17,2} \right)^{1/4,1}, & 1 \leqslant \overline{M} \leqslant 4,08 \\ (R + R_{\text{э ц}}) \operatorname{tg} \left[\dfrac{2\theta_{0,5}}{87,1} \left(\dfrac{\overline{M}}{4,08} \right)^{1/s_0} \right], & \\ 1 < \dfrac{\overline{M}}{4,08} < (87,1/2\theta_{0,5})^{\frac{s_{10} - 6,1}{4,02}}, & \end{cases} \qquad (5.1.2)$$

где $2\theta_{0,5}$ — в градусах; величина $R_{\text{э ц}}$ зависит от относительного расстояния x, $M = \Pi_0/\Pi_p$, а Π_p задаются обычно кратными 1, 2 и 5 в пределах реальных значений ППМ; $s_0 = (\delta_{10} - 6,1)/4,02$.

Такой путь решения можно рекомендовать для выполнения на КВМ или ЭВМ. Для ручного расчета можно воспользоваться графиками, упрощающими расчет осевого поля $\Pi_0(R)$ на основании x и δ_1; ВДИ строить на основании R и n, а расстояние мнимого центра $R_{\text{э ц}}$ учитывать путем смещения вершины угла влево из центра апертуры на соответствующее расстояние. Всего для построения стандартной ВДИ требуется рассчитать около 150 точек. Обозначения см. в табл. 5.1.1.

5.1.2. Ручной расчет ВДИ в обычных обозначениях. Время расчета 150 точек — около 30 ч.

1. Выбираем дискретность расчета по расстоянию и ППМ: обычно $R_p = 50$, 70, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1 000, 1 500, 2 000, 3 000, 5 000, 7 000 и 10 000 м.

$$\Pi_p = 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, \ldots, \Pi_{\text{р макс}} \leqslant P\eta \cdot 10^2/S$$

---

* Обычно углы θ не превышают 30°, т. е. с достаточной точностью можно принять горизонтальную дальность равной наклонной, и в дальнейшем эти понятия не дифференцировать.

Таблица 5.1.1

Принятые обозначения исходных данных для расчета ВДИ

Обычное обозначение	Единицы	Обозначение для КБМ и ЭВМ	Параметр
P	Вт	U	Полная мощность передатчика
η	—	—	К. п. д. фидерного тракта
S	м²	—	Геометрическая площадь антенны
δ_{1a}	дБ	K	Уровень 1-го бокового лепестка в плоскости δ (модуль уровня в децибелах)
δ_{1b}	дБ	L	То же в плоскости ψ
$2a$	м	B	Геометрический размер антенны в вертикальной плоскости
$2b$	м	C	То же в горизонтальной плоскости
$2\theta_{0,5}$	град	D	Ширина главного лепестка антенны в вертикальной плоскости
$2\varphi_{0,5}$	град	E	То же в горизонтальной плоскости
R	м	R	Расстояние „точка наблюдения—антенна"
Δ	м	T	Превышение точки наблюдения над расчетной точкой
Π_p	мкВт/см²	Π	Выбранные значения линий плотностей
Π_s	»	A	$P \cdot \eta 10^2/S$
$x_{a\,ц}$	—	d	Приведенное расстояние мнимого амплитудного центра в расчетной плоскости (обычно 0)
$R_{a\,ц}$	м	v	$x_{a\,ц} \cdot 57{,}3 \cdot 2a/\theta_{0,5}$
M_p	—	M	$\Pi_s/\Pi_p \geq 1$
x_a	—	a	$R\theta_{0,5}/2a \cdot 57{,}3$
x_b	—	b	$R\varphi_{0,5}/2b \cdot 57{,}3$
$\Pi_0(R)$	мкВт/см²	P	Осевая плотность мощности
	—	N	Номер задачи, месяц и год решения (задается при расчете на ЭВМ)

2. Рассчитываем $x_a = R_p/R_{za} \geq 0{,}1$, где $R_{za} = 2a/\theta_{0,5}$; $x_b = R_p/R_{zb} \geq 0{,}1$ где $R_{xb} = 2b/\theta_{0,5}$.

Ограничение $x \geq 0{,}1$ выбрано, чтобы упростить расчет.

3. По графикам $k(\delta_1)$ рис. 4.3.3 определяем $k(\delta_{1a})$ и $k(\delta_{1b})$.

4. С учетом графиков $\Phi(x)$ (рис. 4.3.3) по формуле

$$\Pi_s(R) = \Pi_S \Big/ \left[k_a + \frac{1}{k_a}\Phi(x_a)\right]\left[k_b^2 + \frac{1}{k_b}\Phi(x_b)\right],$$

где Π_S [мкВт/см²] $= P$ [Вт] $\eta 10^2/S$, рассчитываем $\Pi_s(R_p)$.

5. Определяем $M_p = \Pi_0(R_p)/\Pi_p > 1$.

6. По графику рис. 4.3.6 определяем $n_p(M_p)$ при заданном δ_0.

7. Рассчитываем $\vartheta_p = n_p \cdot 2\vartheta_{0,5}$.

8. По имеющимся Π_p, R_p и ϑ_p строим изолинии ППМ. При отсчете угла ϑ_p используется правая шкала углов ε, а вершина находится на оси расстояний влево от точки ($R=0$, $\Delta=0$) на расстоянии $R_{з.ц} = 0{,}1 \cdot R_{max}$ (рис. 5.1.3).

На основании R_p и ϑ_p на подготовленной заранее сетке наносятся точки, которые для каждой Π_p соединяются плавной кривой (рис. 5.1.2).

5.1.3. Расчет ВДИ на клавишно-вычислительных и электронно-вычислительных машинах. Время расчета на КВМ 150 точек около 8 ч; обозначения см. в табл. 5.1.1. Конечная цель расчета — получить

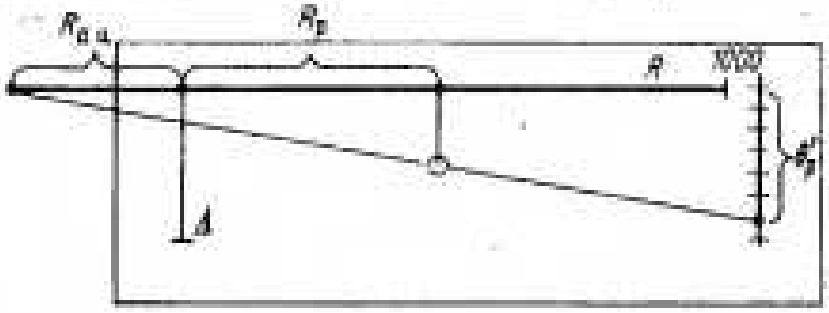


Рис. 5.1.3. Фрагмент построения ВДИ.

зависимость (по новому обозначению) $T(R)$ для нескольких Π_p. Необходимо задать: N, U, B, C, D, E, K, L (принят к. п. д. $\eta = 0{,}8$; N — номер задачи, который ей присваивается до расчета).

Расчетные соотношения используются в следующем порядке:

$$a = RD/114{,}6B \geqslant 0{,}012; \quad b = RE/114{,}6C \geqslant 0{,}012.$$

$R = 50, 70, 100, 150, 200, 300, 500, 700, 1\,000, 1\,500, 2\,000, 3\,000, 5\,000.$

$$R \geqslant 1{,}38\,B/D \text{ и } R \geqslant 1{,}38\,C/E;$$

$$\Phi_a = (4/\pi)\,a \cdot \operatorname{arctg} 4{,}6\,a; \quad \Phi_b = (4/\pi)\,b \cdot \operatorname{arctg} 4{,}6\,b;$$

$$k_a = -0{,}00001K^2 + 0{,}03K + 0{,}804;$$

$$k_b = -0{,}00001L^2 + 0{,}03L + 0{,}804;$$

$$A = 80U/BC; \quad P = A/[k_a + \Phi_a/k_a]\,[k_b + \Phi_b/k_b];$$

$$\Pi = 1, 2, 5, 10, 20, \ldots \leqslant A; \quad M = P/\Pi > 1,$$

$$d = \begin{cases} 6{,}61a^{0{,}85} & 0{,}012 < a \leqslant 0{,}025, \\ 0{,}044a^{-0{,}43} & 0{,}025 < a \leqslant 0{,}042, \\ 0{,}0422a^{-0{,}48} & 0{,}042 < a \leqslant 0{,}12, \\ 0{,}1 & 0{,}12 < a; \end{cases}$$

$$v = 114{,}6dB/D;$$

$$T = \begin{cases} \dfrac{D}{114{,}6}(R+v)\,(M-1)^{0{,}24}; & 1 \leqslant M \leqslant 4{,}08, \\ (R+v)\operatorname{tg}\left[\dfrac{D}{87{,}1}\left(\dfrac{M}{4{,}08}\right)^{4{,}02/(K-6{,}1)}\right], \\ 1 < \dfrac{M}{4{,}08} \leqslant \left(\dfrac{87{,}1}{D}\right)^{(K-6{,}1)/4{,}02}. \end{cases}$$

Контрольный пример. Задано: $U=1\,250$; $B=C=10$; $D=E=2$; $K=L=13$; $P=100$; $H=10$. Ответ: $T=19{,}83$.

Контроль позволяет убедиться в правильности росписи и хода вычислений, в некоторых случаях избежать промахов, и поэтому его желательно проводить до и после выполнения расчета каждой ВДИ.

Расчет на ЭВМ практически не отличается от приведенного выше. Программа расчета, выполненная на языке АЛГОЛ-60 *, приведена в табл. 5.1.2. Ввод исходных данных проводится в такой последовательности: N, U, B, C, D, E, K, L. Вывод данных (столбцами): R, N, P; H, T. В данной программе предусмотрены два контрольных просчета: один из них соответствует приведенному выше (методика расчета на КВМ), другой выполняется по значительно упрощенным формулам для заложенных исходных данных, но лишь для $R=100$ м и $H=10$ мкВт/см^2. Результаты этого расчета сравниваются с величиной T соответствующего столбца. Расхождение не должно превышать 30 ... 50%.

Программа, приведенная в табл. 5.1.2, выполнена на строкопечатающем устройстве, в котором строчные буквы печатаются с запятой, поставленной под прописной буквой; служебные слова и arctg подчеркнуты.

5.1.4. Использование ВДИ. В процессе пользования ВДИ возможны следующие характерные случаи:

а) $\Delta=0$; $\varepsilon=0$ — поле на оси луча. ППМ определяется вдоль оси расстояний R;

б) $\Delta=0$; $\varepsilon\neq0$. На ВДИ проводится вспомогательная линия так, чтобы один ее конец проходил через точку $\Delta=0$, а другой — через данное значение угла наклона антенны $\varepsilon\neq0$ (угол ε может быть положительным или отрицательным). Искомые ППМ находятся по этой линии;

в) $\Delta\neq0$; $\varepsilon\neq0$. На ВДИ проводится вспомогательная линия так, как это делается в предыдущем случае. Затем параллельно ей через значение Δ, равное заданному, проводится вторая линия, на которой уже и отыскиваются нужные ППМ.

Примеры для случаев б) и в) при $\varepsilon=+3^\circ$ и $\Delta=+10$ м приведены на рис. 5.1.2. Превышение центра антенны над расчетной точкой Δ (рис. 5.1.4) определяется следующим образом:

Для горизонтальной местности: $\Delta=H-h$.

Для местности с подъемами и спусками $\Delta=H\pm h_{\text{п}}-h$, где $\pm h_{\text{п}}$ — высота спуска или подъема соответственно (обозначения см. на рис. 5.1.4). Значение $h_{\text{п}}$ может быть определено по нанесенным на карте горизонталям или топографической съемкой местности.

5.1.5. О расчете необходимой высоты подъема антенны или увеличения угла места диаграммы. Для опреде-

* Программа подготовлена Н. Н. Будаевой.

```
BEGIN
  REAL D,B,A,B,E,C,G,KA,PA,L,KB,PB,P,A,B2,D,V,T1,
       T2,R2,D2,M,I,J;
  INTEGER I,J,N,NI;
  ARRAY R[1:13],D[1:18],MI[1:18];
 PROCEDURE M;
BEGIN
M16: A:=11*0,8*LOG(18*C):A:=(R[13]*D)/(514,8*B);
B:=(R[13]*E)/(114,8*C);
IF A<=0.012 THEN  GO TO M15;
     KA:=191,7*P*K*K1*(3,7-3,5*K)+0,804;
PA:=14/3.14159273*A*ARCTG(4,8*A);
KB:=(91,7-5*C*L)*3,7-3*L+0,804;
PB:=(9/3.14159273*B*ARCTG(4,8*B);
P:=A/((1/KA*KA*PA)+(1/KB*KB*PB));
MIJ1:=P/D[2];
IF MIJ3<=1 THEN  GO TO M15;
IF A>0.012MA<=0.025 THEN D:=6,81*A+0,95 ELSE
     IF A>0.025MA<=0.042 THEN D:=0,044*A+
   (=0.45) ELSE  IF A>0.042MA<=0,12 THEN
     D:=0.042*A+(=0.42) ELSE D:=3,1;
   V:=114,8*B*B,B;
IF MIJ1>1MMIJ1<=4,08 THEN  GO TO M5;
IF MIJ1>4,08MMIJ1<=4,08*(R7,1/D3)*(R-6,1)/4,02)
     THEN  GO TO M6;
GO TO M15;
M5: T1:=(D/114,83)*(R[1]*V1+(MIJ1-1)*0,24);
GO TO M16;
  M6: T1:=(R[1]*V1*TG(D/87,3*(MIJ1/4,08)+(4,02/
      (R-6,1)));
GO TO M16;
M15: GO TO M17;
M16: ВЫВОД(8,1,I,N,P,D[1],T1)
```

Таблица 5.1.2

НА ЯЗЫКЕ АЛГОЛ - 60

```
M17;
END ;

        I:=1;
        J:=1;
M1: B:=2500;
B:=6:=10;
D:=E:=2;K:=L:=13;A[1]:=100;B[J]:=10;
4;

B[13]:=50;
;
;
B[131]:=5000;

D[14]:=3;
;
;
D[181]:=5000000;

M4:BBDZIN-V.B.C.D.E.K.L);

I:=1; J:=1;

M7: M;

IF I<13 THEN
BEGIN
      I:=I+1; GO TO M7

END ;
  IF J<10 THEN
BEGIN
        J:=J+1; I:=3; GO TO M7

END ;
  M11;R2:=1000; B2:=100; A:=(R2+D)/(114,6+B);

 B:=(R2+E)/114,6+C); D:=0.1; E:=(B*D+114,5)/D;

 M:=A/(11+5,7+B*ARCTG(4,6+E)/3,14159271+
     (1+5,7+B*ARCTG(4,6+5))/3,14159271); B2:=M/B2;

 E2:=(R2+V1,1D/BT,1)*((B2/4,00)+4,B2/(K+ 6,1));

        BUBOR(R2,M,P,B2,T2);

  GO TO M4;

M9;

END ;
```

ления высоты подъема антенны РЛС (например, в целях защиты) от первоначального значения Δ до Δ_0 или увеличения угла места диаграммы от ε до ε_0 для уменьшения уровня поля до необходимого минимума (обычно 10 мкВт/см^2) можно воспользоваться готовой ВДИ станции. Подробнее об этом см. п. 7.2.3.

5.1.6. О коррекции расчета поля на основании экспериментальных данных. Возможность прямого ввода коррекции в расчет ВДИ Р-методом на основании экспериментальных данных обусловлена относительно простой зависимостью плотности мощности в главных плоскостях

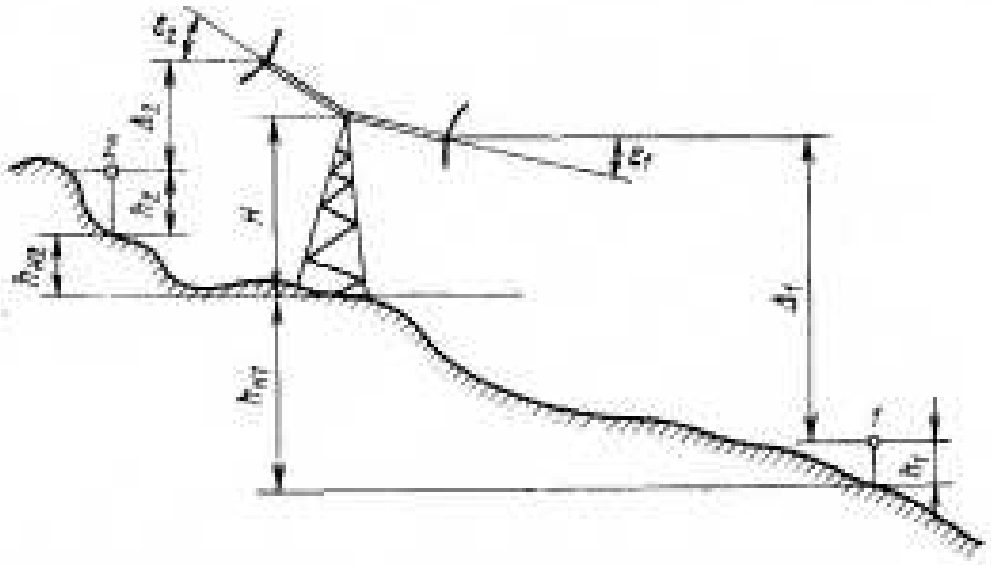


Рис. 5.1.4. Определение Δ для двух характерных случаев (индексы 1 и 2 при h и Δ соответствуют расчетным точкам 1 и 2).

антенн от отдельных параметров станции (см. п. 4.3.3).

5.1.7. Расчет ВДИ на заводах-изготовителях. Особенность расчета ВДИ на заводах-изготовителях заключается в следующем. При серийном выпуске радиоизлучающей аппаратуры, например РЛС, оказывается возможным сгруппировать станции по одинаковым отклонениям от средних значений изменяемых параметров и в дальнейшем для включения в документацию ВДИ делать соответствующий выбор из заранее заготовленного набора диаграмм, рассчитанных для дискретных значений изменяемых параметров. Таким нестабильным от экземпляра к экземпляру параметром для РЛС является обычно уровень первого бокового лепестка и реже — ширина основного лепестка диаграммы.

При классификации ВДИ по первому параметру группировку для расчета ВДИ следует производить с дискретностью δ_1 всего 1 дБ. Например, для возможного интервала 18 ... 22 дБ следует сделать расчет ВДИ для $\delta_1 = 18$, 19, 20, 21 и 22 дБ (δ_1 — в вертикальной плоскости!) Непостоянство ширины основного лепестка диаграммы направленности встречается гораздо реже. При необходимости расчет двух-трех ВДИ проводится с дискретностью 0,1 ... 0,2 ширины в соответствующей плоскости.

Кроме набора ВДИ по нестабильным параметрам приходится делать расчет также для всех возможных режимов работы антенны и передатчика (например, для двух или нескольких номинальных значений выходной мощности передатчика), если для каждой позиции выбор между ними предопределяется заранее и в течение длительного времени остается неизменным.

Расчет ВДИ производится любым из перечисленных выше способов. Выбор конкретных ВДИ для включения их в документацию конкретной станции производится на основании определяемых во время обычных испытаний параметров, например P, δ_1 и $2\theta_{0,5}$. Если нестабильным оказывается только один из этих параметров, удобно воспользоваться результатами специальных измерений ППМ в зоне действия РЛС. Условия этих измерений должны исключать существенное влияние земли и местных предметов и тем более соседних работающих РЛС. Для выбора ВДИ обычно бывает достаточно произвести тщательные измерения ППМ в двух-трех точках на расстоянии 100 ... 1000 м, лучше всего на высоте 3 ... 7 м от земли. Выбор точек производится заранее с учетом формы диаграммы излучения, точки должны быть тщательно привязаны к точке стояния станции. Привязка делается один раз и в дальнейшем не меняется, т. е. каждую РЛС перед выпуском ставят на одно место, лучше всего на насыпь, выставляют заданные значения параметров антенны и передатчика и производят необходимое количество измерений в заранее выбранных точках (об условиях измерения см. также § 6.2).

В дальнейшем при выборе позиции, проектировании размещения населенных пунктов и во время эксплуатации ВДИ является документальным основанием для организации защиты в зоне действия станции вплоть до проведения массовых точных измерений ППМ в зоне

действия работающей станции. Такие измерения позволяют учесть все тонкости влияния условий распространения радиоволн, распределения поля в окрестности точки измерения и поэтому должны считаться наиболее точным материалом для принятия решения о завершении работы по организации защиты.

5.1.8. Расчет поля переливов. В связи с быстрым затуханием поля переливов (см. § 1.2) оказываются опасными только в непосредственной близости от антенны (2 ... 10 раскрывов). Для зеркал с облучателем расчет поля переливов ведется на основании следующих данных: мощности излучения $P_{\text{п}}$, уровня поля на краю зеркала $П_{\text{кр}}$, расстояний облучатель — кромка зеркала $r_{\text{кр}}$ и кромка зеркала — расчетная точка $r_{\text{т}}$. В связи с тем, что обычно $R > r \gg \lambda$, в первом приближении расчет уровня поля перелива в заданной точке $П_{\text{п}}$ может вестись по квадрату расстояний.

Для двухзеркальных антенн (рис. 5.1.5) расчет ведется раздельно для двух систем: «вперед» для системы облучатель — контррефлектор, «назад» для системы «контррефлектор — зеркало».

5.1.9. Расчет ППМ для оценки биологической опасности на борту летательных аппаратов. При пролете летательных аппаратов вблизи современных РЛС экипаж и пассажиры могут подвергнуться более или менее длительному воздействию радиополя [162]. Так, при работе новейшей американской РЛС в Хайстеке осевая плотность мощности около 10 мВт/см² сохраняется неизменной вплоть до расстояния 17 км, и при пролете в этой зоне аппарат может кратковременно подвергнуться облучению энергией высокой плотности. При работе станции дальнего обзора типа AN/FPS-49 плотность мощности 10 мВт/см² оказывается на расстоянии всего лишь 1 км, но зато с приближением к антенне она быстро возрастает до 55 мВт/см² (см. § 1.2). Поэтому учет опасности воздействия радиоволнового излучения на экипаж и пассажиров летательных аппаратов в зоне действия мощных РЛС считается обязательным при прокладке воздушных трасс и организации необходимых мер предосторожности.

Оценку биологической опасности в настоящее время производят и для космонавтов. Например, перед полетом американского космического корабля «Джемини-12» был произведен расчет опасности для выходящих в от-

крытый космос космонавтов от радиоизлучений РЛС, которым подвергаются космонавты. В соответствии с американскими нормативами, полученное значение ППМ (17 мкВт/см²) оказалось неопасным для неограниченного времени облучения.

Определение степени потенциальной опасности может быть проведено расчетными и инструментальными методами. При расчете ППМ для летательных объектов следует иметь в виду, что обычными методами удается достаточно просто определить величину потока мощности,

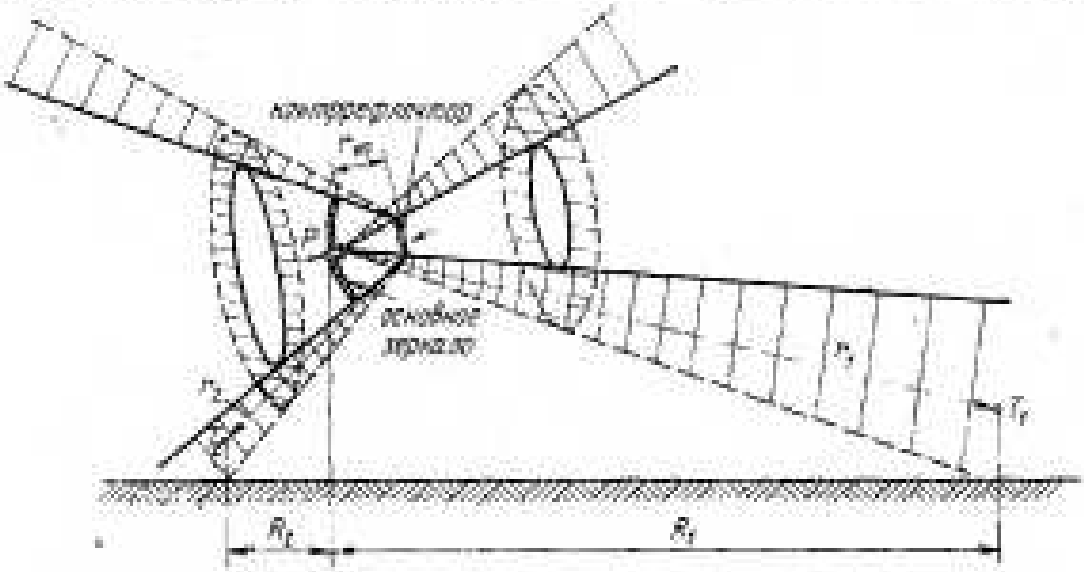


Рис. 5.1.5. Побочные излучения двухзеркальных антенных систем.

падающей на корпус объекта или скафандр космонавта. Интенсивность поля, проникающего через проемы и электрические неплотности летательных аппаратов и скафандров, зависит от многих факторов и, в частности, от длины волны, размеров отверстий, расстояния от отверстия, ракурса облучения и т. п. Поэтому расчет внутренних полей оказывается здесь очень сложным и проводить его практически нецелесообразно; пока единственным способом определения биологической опасности оказываются здесь измерения.

Если степень опасности определять на основании только данных о максимальной ППМ без учета времени воздействия, то ее значение окажется явно завышенным (исключение могут составить только случаи автосопровождения достаточно мощной станцией самолета, вертолета или космического корабля). Наиболее точный и

всеохватывающий учет времени в общем случае может быть осуществлен только на основании дозиметрического подхода. При расчете опасности дозными методами должны быть учтены отдельно плотность потока и время либо с помощью специальных приборов (СВЧ дозиметров) измерена падающая доза.

5.1.10. Особые случаи расчета. К особым случаям расчета можно отнести расчет поля вне главных плоскостей, расчет поля диаграмм специальной формы (косеканс-квадратных, парциальных, сфокусированных и др.).

Прямой **расчет поля прямоугольных антенн вне главных плоскостей** — задача трудная и практически довольно редкая. Она может встречаться при оценке поля неподвижных антенн для фиксированной точки местности. В этом случае для оценки порядка величины можно рекомендовать воспользоваться следующей формулой:

$$\Pi(R, \theta, \varphi) \approx \Pi_0(R) \overline{M}(\theta) \overline{M}(\varphi),$$

где $\Pi(R, \theta, \varphi)$ — плотность мощности вне главной плоскости в точке с координатами R, θ и φ (рис. 5.1.6); $\overline{M}(\theta)$ и $\overline{M}(\varphi)$ — М-функция для осей θ и φ.

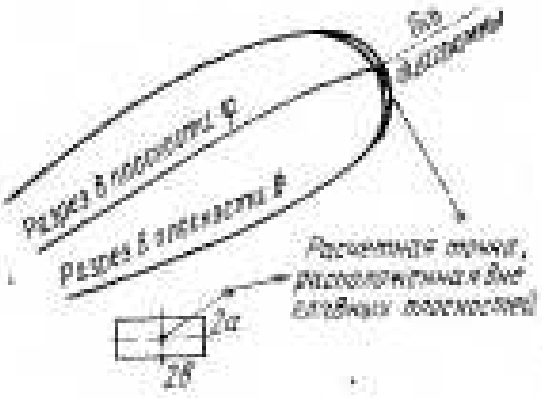


Рис. 5.1.6. К расчету плотности мощности вне главных плоскостей (вид на антенну спереди).

Естественно, использование понятия «главных плоскостей» для круглых апертур смысла не имеет. ВДИ, рассчитанная для круглой антенны, пригодна для работы при любых поворотах антенн вокруг своей оси.

Косеканс-квадратные диаграммы, формируемые одним облучателем и зеркалом специальной формы, как правило, деформированы «вверх» относительно направления максимального излучения (условно назовем это направление осью). Как показывает эксперимент, приближенный расчет бокового поля «вниз» не отличается от расчета симметричных диаграмм; однако при расчете осевого поля по коэффициенту усиления антенны (который обычно задается) приходится находить эквивалентную ширину диаграммы направленности в вертикальной плоскости:

$$2\theta^0_{0,5\text{экв}} = 4\pi k_{\text{исп}} \cdot 57,3^2 / 2\theta^*_{0,5} G, \qquad (5.1.3)$$

где G — коэффициент усиления антенны; углы θ и φ — в градусах, $k_{\text{исп}}$ — коэффициент использования поверхности. Таким образом, вместо угла $\theta_{0,5}$ в формулу для расчета осевого поля следует подставить $\theta_{0,5\text{экв}}$. Расчет поля выше электрической оси этим методом проводить нельзя.

Расчет поля в зоне действия антенн, формирующих **парциальные (лепестковые) диаграммы направленности**, производится отдельно

для каждой диаграммы. Обычно влияние верхних диаграмм по сравнению с нижними на боковое поле незначительно и можно ограничиться расчетом поля от одного-двух лепестков. Для некогерентных лучей искомая величина плотности мощности равна сумме определяемых значений для каждой диаграммы; если поле облучателей когерентно (например, они подключены к одному генератору), для заданной точки суммарная плотность мощности

$$\Pi_{\Sigma} \leqslant (\sqrt{\Pi_1} + \sqrt{\Pi_2} + \sqrt{\Pi_3} + \ldots)^2, \qquad (5.1.4)$$

где $\Pi_{1, 2, \ldots}$ — ППМ от отдельных диаграмм.

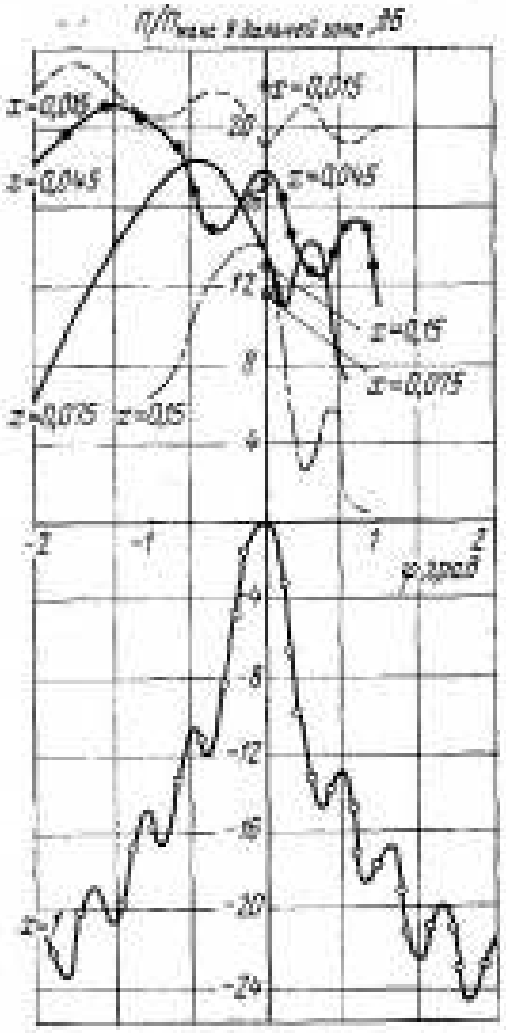
5.1.11. **О расчете поля антенных решеток.** Некоторые рекомендации по расчету интенсивности поля антенных решеток, в частности, сфокусированных в зоне Френеля, можно получить в § 4.2. Иногда, если решетки относительно густы, боковое поле антенных решеток в вертикальной плоскости, для которой характерны простейшие функции распределения поля по стороне апертуры (типа $F_1 \ldots F_6$, табл. 4.3.1), можно рассчитывать Р-методом.

Обычные рекомендации по расчету поля решеток в гладких апертур [70, 84, 141, 187] часто ограничиваются рассмотрением симметричных распределений. Между тем в антенных решетках симметрия освещения апертуры иногда не наблюдается, и тогда расчет видоизменяется. Покажем это на примере расчета осевого поля решетки ненаправленных излучателей. Пусть возбуждение их осуществляется таким образом, что создается экспоненциальное несимметричное амплитудное распределение поля в одной какой-либо плоскости (например, за счет питания решетки с одной стороны), которое можно записать в виде

$$E_n = E_0 e^{-\beta n d},$$

где E_n — амплитуда поля для любого n-го излучателя; E_0 — амплитуда 1-го излучателя; принята за 1; n — порядковый номер излучателей: 0, 1, ... N.

Учитывая приближение Френеля из-за конечной разности хода лучей в фазовом множителе, запишем выражение для поля такой системы в ближней зоне излучения (считаем угол наклона фазового



фронта возбуждения $\psi=0$)

$$E(\bar{\theta}) = A \sum_{n=0}^{N_p} E_n \exp(-jnd) \exp\left[-j\left(-nd\sin\bar{\theta} + \frac{(nd)^2\cos^2\bar{\theta}}{2x}\right)\right],$$

где A — постоянный множитель вынесенный за знак суммы. Беря модуль этого выражения, получаем диаграмму излучения в зоне Френеля. Исследование проводилось для линейной решетки излучателей размером 13λ. Амплитуда поля в раскрыве последнего излучателя составляла 0,224 от единичной амплитуды первого излучателя. На рис. 5.1.7 приведены значения ППМ для этой системы, нормированные к значению ППМ главного максимума излучения на границе дальней зоны. На этом же рисунке внизу для сравнения приведены известные значения ППМ для системы, имеющей равномерное распределение в раскрыве для $x=1$ [141].

В случае перемещения точки наблюдения от границы дальней зоны к антенной системе основной лепесток диаграммы направленности начинает расширяться. Далее диаграмма становится асимметричной, главный максимум излучения смещается с нулевого азимутального направления в сторону наибольших значений амплитуд поля в раскрыве. При $x=0{,}000$ диаграмма вырождается в осциллирующую кривую, огибающая которой фактически повторяет поле в раскрыве.

Рассмотренный случай позволяет увидеть качественную картину распределения поля несимметрично освещенных апертур. Абсолютное значение ППМ в луче такой антенны можно определять по формулам (1.2.1) и (1.2.2).

Приведенные в § 5.1 рекомендации далеко не исчерпывают все возможные варианты расчета поля в свободном пространстве, однако, как показывает опыт, они помогают охватить подавляющее большинство интересующих практику случаев.

При расчете поля любым, в том числе и Р-методом, с помощью ВДИ, точность прогноза может оказаться удовлетворительной только в том случае, если а) из расчетной точки видна вся апертура антенны, б) трасса распространения радиоволн находится достаточно высоко над землей (не ниже 10 ... 30 длин волн). В противном случае необходимо дополнительно учитывать влияние земли и местных предметов. Но об этом — в следующем параграфе.

5.2. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

До сих пор нас интересовал расчет поля, интенсивность которого полностью определялась параметрами излучающего устройства и совершенно не зависела от свойств пространства на трассе и в окрестности расчетной точки. Подобного рода идеализация не только в значительной степени упрощает конструирование расчетных методов, но иногда даже позволяет приблизить расчет к реальности: например, когда трасса оказывается относительно короткой или когда излучающая антенна и рас-

четная точка подняты над землей по крайней мере на несколько десятков длин волн, а между ними отсутствуют предметы, искажающие общую картину распространения электромагнитной энергии на трассе [2]. Между тем, чаще всего хотя бы одно из этих условий оказывается невыполненным, и тогда требуются дополнительные расчеты, учитывающие распространение и распределение энергии.

5.2.1. Реальные условия распространения. Такие условия характеризуются следующими данными: расстояния обычно много меньше пределов прямой видимости и составляют 2 ... 5, много реже — 10 ... 30 км.

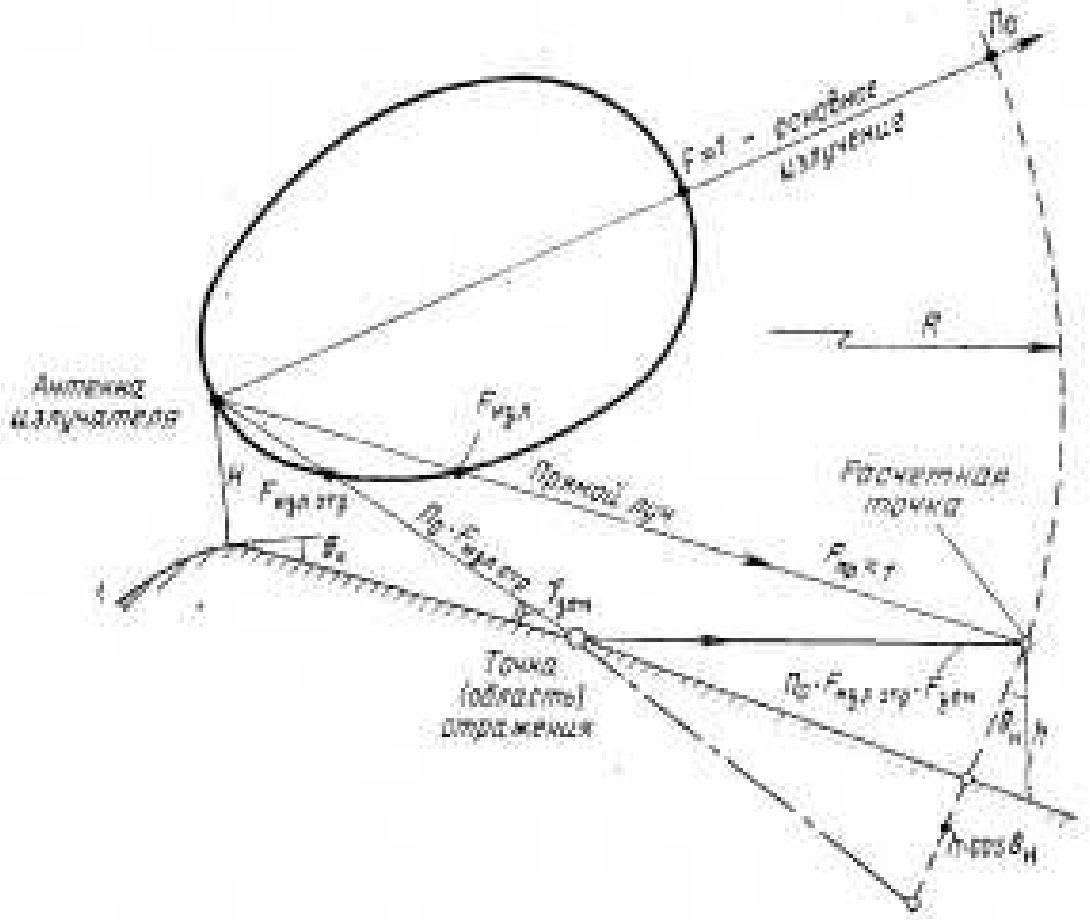


Рис. 5.2.1. К расчету поля с учетом влияния отражений от земли.

На таких расстояниях можно говорить только о поверхностной волне, распространяющейся над плоской землей; на величину сигнала в расчетной точке оказывают влияние практически только «подстилающая» поверхность [43], а влиянием среды распространения можно пренебречь: для всего диапазона СВЧ затухание не зависит от состояния атмосферы, находится в пределах 0,01 ... 0,05 дБ/км и лишь для длины волны 1 ... 5 см

при проливном дожде затухание возрастает до 0,1 ... ... 0,2 дБ/км [136]. Кроме того, на малых расстояниях резко уменьшается частота появления и глубина замираний, обусловливаемых специфическими особенностями тропосферного распространения (хотя появляются такие причины флюктуаций, как нестабильность механических креплений антенны-излучателя, перемещение предметов на трассе и т. п.). Таким образом, уровень поля в любой точке пространства в основном определяется интерференционной картиной, устанавливающейся как результат взаимодействия прямого и отраженного от земли лучей (рис. 5.2.1). Чем меньше КНД антенны излучателя $F_{изл}$ в направлении на точку отражения, чем меньше коэффициент отражения от земли $F_{зем}$, тем меньше заметно это влияние. Для $F_{изл}^2 \leqslant 0{,}1 \ldots 0{,}2$ влияние земли можно не учитывать, так как она практически не искажает картину распространения по прямому лучу. На больших расстояниях земля оказывает сущест-

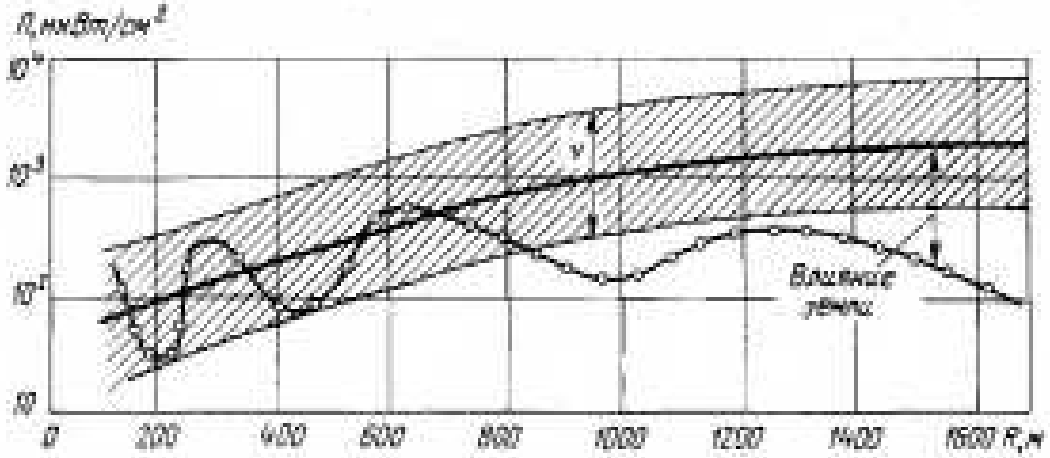


Рис. 5.2.2. Типичная картина изменений ППМ на высоте 1,6 м от земли в сравнении с расчетом, проведенным без учета влияния земли.

—— — расчет, —○— — эксперимент; v=12 дБ.

венное влияние, увеличивая или уменьшая первичное поле (свободного пространства). На дальних расстояниях $R \gg H$ или $R \gg h$ реальная интенсивность поля обычно падает быстрее, чем $1/R^2$ (рис. 5.2.2). Попытка (в соответствии с рекомендациями некоторых авторов) упрощенно учитывать влияние земли учетверением плотности мощности (крайний случай: сложение в фазе прямого и отраженного лучей при $F_{изл}F_{зем} \approx 1$), как правило, приводит к расхождению расчета с экспериментом в десятки раз, поэтому здесь необходим более тонкий расчет.

5.2.2. **Учет влияния плоской полупроводящей земли.** Достаточно точно учесть влияние плоской полупроводящей земли на малых и отчасти средних расстояниях можно по так называемым интерференционным отражательным формулам, приведенным ниже. Вообще влияние трассы принято характеризовать множителем земли: v — по напряженности поля или v^2 — по мощности; тогда уровень плотности мощности с учетом земли оказывается равным

$$\Pi_{\text{зем}} = \Pi v^2, \tag{5.2.1}$$

где Π — расчетное значение плотности мощности, определенное без учета влияния земли.

Интерференционная картина, устанавливающаяся над землей, определяется величиной модуля коэффициента отражения от земли $F_{\text{зем}}$ и сдвигом фазы при отражении β, зависящих не только от

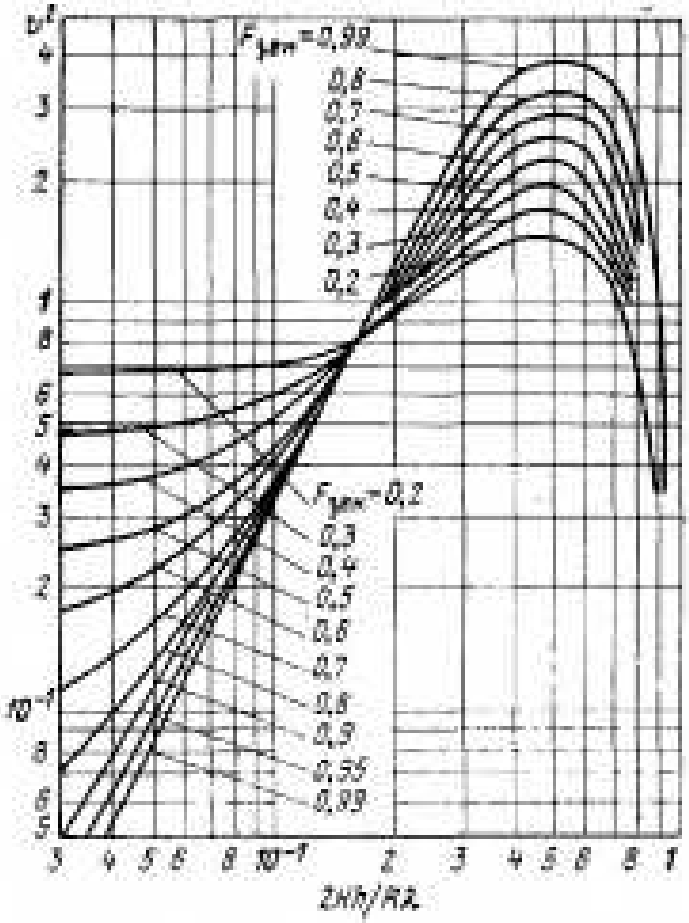


Рис. 5.2.3. Угловая зависимость множителя земли при различных $F_{\text{зем}}$; $(2\pi h/R\lambda - i) < 1$, $i = 0, 1, 2, \ldots$

свойств земной поверхности в точке* отражения, но и от «угла встречи» («угла скольжения») $\gamma_{\text{зем}}$ и от соотношения $F_{\text{вол}}$ и $F_{\text{вол отр}}$ (см. рис. 5.2.1).

---

* Точнее, в области, ибо канал связи излучатель—земля—приемник представляет собой своеобразный «рукав», коридор.

Для упрощения обычно принимают $F_{пр}=1$, $F_{пов}=F_{зем\ отр}$; тогда множитель земли может быть определен как

$$v=\sqrt{1+F_{зем}^2+2|F_{зем}|\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\Delta r+\beta\right)}, \qquad (5.2.2)$$

где $\Delta r\approx 2Hh/R$ — разность хода между прямым и отраженным лучами.

На относительно больших расстояниях R и малых высотах антенн излучателя H и антенны приемника h, если выполняется условие $(H^2-h^2)/2R^2\ll 1$ [136], разность хода лучей оказывается равной приблизительно $2Hh/R$, и тогда для расчета v можно пользоваться простыми графиками, учитывающими лишь минимум необходимых

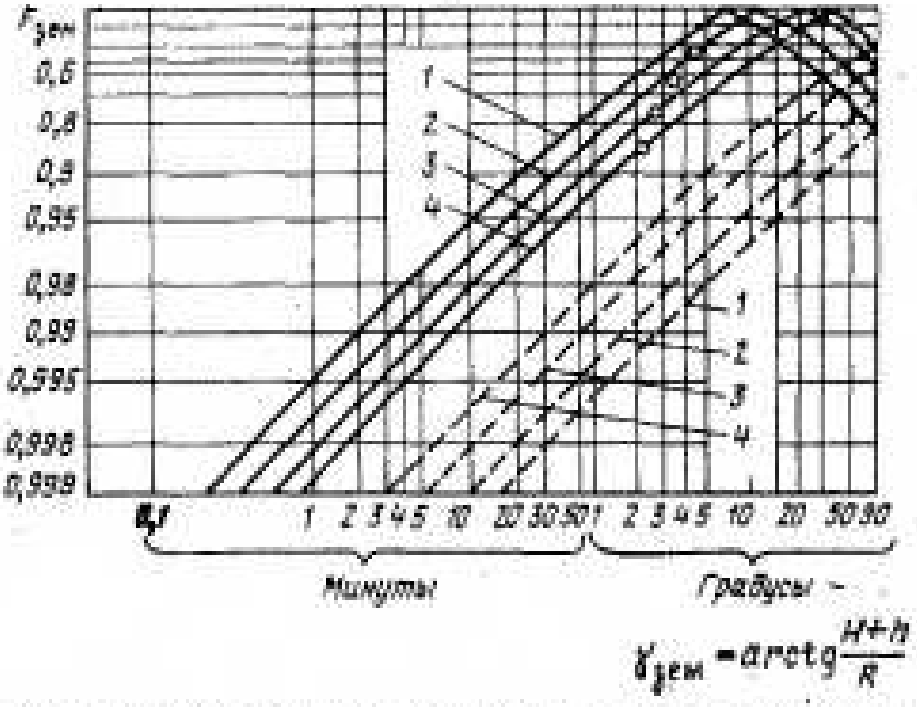


Рис. 5.2.4. Коэффициент отражения для различных почв в диапазоне частот до 4 ГГц

теоретическая зависимость: ——— — вертикальная поляризация, — — — — горизонтальная поляризация; —O—O—O— — экспериментальная зависимость для суши (длина волны $\lambda=3\ldots80$ см [81], обе поляризации) [136].

1 — морская поверхность; *2* — влажная почва; *3* — суша; *4* — сухая почва.

данных: $F_{зем}$, $\gamma_{зем}$ и характер отражающей поверхности (рис. 5.2.3 и 5.2.4).

Для ровной трассы с постоянным наклоном местности угол встречи можно определить по формуле, считая $\cos\theta_н\approx 1$,

$$\gamma_{зем}^{\circ}\approx arctg\frac{H+h}{R}\approx\frac{H+h}{R}57{,}3^{\circ}. \qquad (5.2.3)$$

Наиболее близкое совпадение рассчитанных по интерференционным формулам данных с экспериментальными оказывается на средних расстояниях (до 1 ... 2 км); на больших расстояниях реальное ослабление поля землей намного выше предсказанных по интерференционным формулам, особенно при малых h. Кроме того (и это

наиболее важно!), интерференционные формулы в обычном изложении [типа (5.2.2)] *непригодны для расчета влияния земли, если излучатель имеет узкую вертикальную диаграмму излучения*, когда ни при каких реальных допущениях точности расчета интерферируемые лучи вообще не могут быть сонзмеримыми по амплитуде. Таким образом, например, оказывается, что *нельзя считать одинаковыми по эффекту подъем на одинаковую высоту ближнего объекта и антенны излучателя*. Формула (5.2.3), между тем, утверждает обратное.

Вообще говоря, резкое снижение влияния отраженных от земли лучей у диаграмм излучателей с достаточно большим снижением интенсивности по углу в вертикальной плоскости относительно направления на расчетную точку должно привести только к увеличению ППМ в этой точке по сравнению с рассчитанной по формуле (5.2.2). На практике все бывает наоборот. Это следует иметь в виду и принимать окончательное решение о затратах больших средств на проведение защитных мероприятий только после контрольных измерений.

Задача тем более усложняется в случае **неровной** трассы, когда приходится в обязательном порядке строить разрезы местности по всем интересующим направлениям и определять возможные пути распространения энергии индивидуально для каждого случая. На рис. 5.2.5 показан один из возможных случаев исследуемой трассы — всего с одним изломом. Расчет в этом случае следует проводить по формулам (5.2.1)—(5.2.3), но значения входящих в них величин будут существенно зависеть от отношения R_1/R.

Характерной особенностью искажения первичного поля при распространении энергии над полупроводящей землей является искажение эллипса поляризации. Специального учета это явление при радиопрогнозе не требует, однако его следует иметь в виду во время измерений. Поглощение волны почвой приводит к дополнительному наклону вектора Пойнтинга к земле и к возникновению искажений поляризационной структуры поля (появлению эллиптической поляризации вместо линейной). Угол наклона вектора Пойнтинга для обычных почв находится в пределах 10... 20°, а отношение полуосей эллипса не превышает 0,01 ... 0,1 [130].

Наконец, на малых расстояниях оказывается заметным также влияние на величину множителя земли размеров апертуры [47], которое, однако, даже при очень больших $2a/\lambda$ не превосходит 3 дБ (теоретический максимум).

5.2.3. Распространение СВЧ энергии на закрытой трассе. При распространении волны на закрытой трассе, когда между излучателем и расчетной точкой выше линии прямой видимости находится какое-либо экранирующее препятствие (лес, металлическое сооружение, дом и т. п.), в общем случае на величину коэффициента ослабления влияет относительное расположение точек излучения, приема и кромки препятствия, а также форма и свойства материала препятствия. Принято делить все радиопрепятствия на полупрозрачные и непрозрачные. В первом случае нас интересует так называемое «сквозное затухание», определяемое ослаблением поля материалом препятствия, $B_{\text{сзв}}$ (о нем будет сказано ни-

же, в пп. 7.2.1 и 7.3.1), а во втором — дифракционное $B_{диф}$ (рис. 5.2.6). Дифракционное затухание зависит (кроме угла между границей свет — тень и направлением на точку расчета) практически только от формы

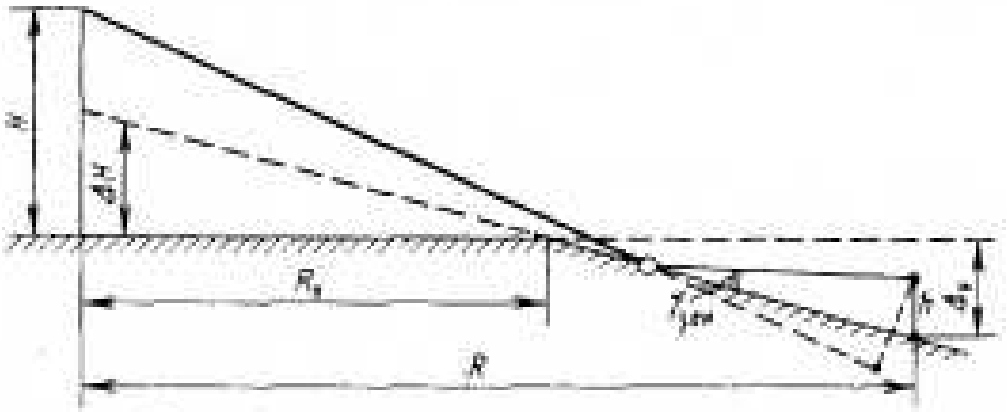


Рис. 5.2.5. К расчету поля для ровной местности с одним взломом.

кромки; наименьшее дифракционное затухание при прочих равных условиях получается при острой ровной кромке, т. е. когда толщина и вертикальные неровности много меньше длины волны. Если кромка зубчатая, на

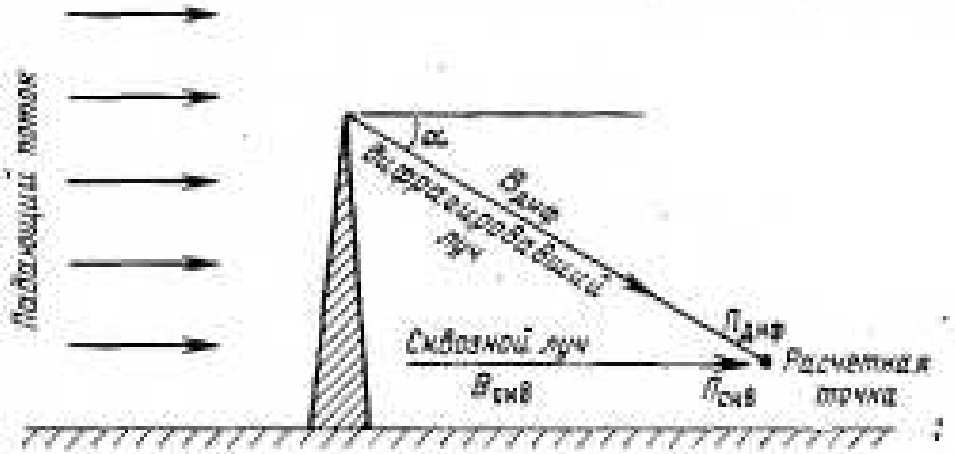


Рис. 5.2.6. Поле в расчетной точке за полупрозрачным препятствием.

некоторых углах α наблюдаются максимумы затухания, намного превышающие среднее значение.

Расчет дифракционного затухания $B_{диф}$ в области тени удобно проводить по графику рис. 5.2.7 [57]. Как можно видеть на рисунке, при больших углах дифракции заметно влияние поляризации.

В некоторых случаях приходится учитывать оба вида затухания: $B_{сн}$ и $B_{диф}$. Например, при проектировании

сетчатых экранов как средств защиты целесообразно выбрать такую сетку и высоту конструкции, чтобы $B_{скв} \approx B_{диф}$. В этом случае каждый из них выбирается так, чтобы

$$B_{скв} \approx B_{диф} \approx B + 6 \qquad (5.2.3)$$

и

$$B_{диф\,б} \geqslant B_{диф\,в} + 10, \qquad (5.2.4)$$

где $B_{диф\,в}$ — затухание волны при дифракции на верхней кромке; $B_{диф\,б}$ — то же на боковых кромках; B — требуе-

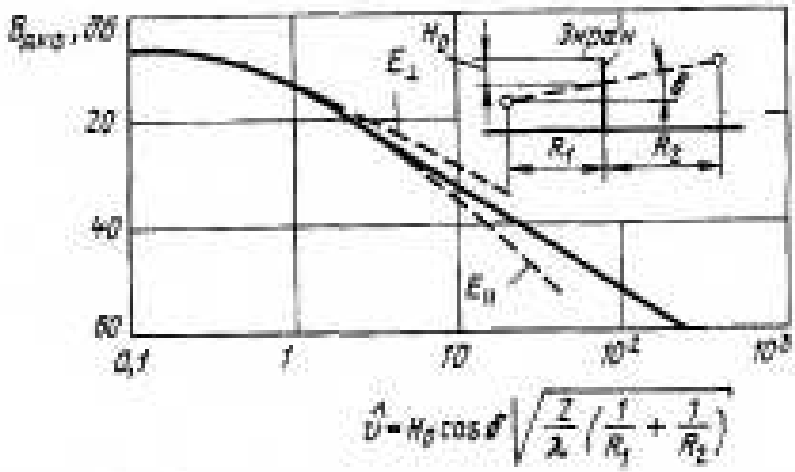


Рис. 5.2.7. Зависимость множителя дифракционного затухания от параметра $\hat{v}$ ($E_\perp$ — вектор E перпендикулярен кромке экрана; $E_\parallel$ — вектор E параллелен кромке).

мое для защиты затухание (все значения затухания даны в децибелах).

Невыполнение первого условия приводит к появлению интерференционных максимумов (из-за взаимодействия «сквозной» и «дифракционной» волн) выше допустимого, а необходимость второго условия вызвана тем, что изготовление и установка высоких экранов, как правило, обходится намного дороже, чем низких, но длинных.

Замечание. При расчете высоты экрана следует иметь в виду, что обычно интенсивность поля с подъемом над землей возрастает (из-за приближения к оси диаграммы излучателя и уменьшения влияния земли), и поэтому несмотря на то, что с увеличением высоты экрана для заданной расчетной точки угол α (рис. 5.2.7) увеличивается и дифракционное затухание растет, плотность мощности в точке может даже увеличиваться. Этот эффект оказывается особенно заметным при острых

диаграммах антенны излучателя, направленных вверх под небольшим углом к горизонту.

5.2.4. О расчете влияния леса. Лес для радиоволн СВЧ оказывается большей частью непрозрачным. Исключение могут составить узкие лесные полосы (шириной десятки или сотни метров). Удельное сквозное затухание лесной полосы зависит от вида деревьев, поляризации и времени года, но в среднем для худших условий (зима) можно принять его равным 0,05 ... ... 0,1 дБ/м. Дифракционное затухание кромки леса пока фактически не исследовано. Предполагается, что оно меньше, чем затухание на острой кромке, но больше, чем на цилиндре [189] (см. также п. 7.2.2).

В условиях большого города расчет затухания с более или менее удовлетворительной точностью считается невозможным [130]. Принимается, что в среднем это затухание равно 3 ... 5 для метровых волн и при отсутствии прямой видимости в несколько раз возрастает с укорочением длины волны до единиц сантиметров.

5.2.5. Влияние распределения поля в окрестности расчетной точки. Типичным примером такого влияния (в отличие от влияния трассы) является изменение интенсивности поля из-за близости больших отражающих объектов: плоских поверхностей (стен домов и т. п.) или вибраторов (металлической ограды, металлических включений в стенах и т. д.). Характер отражения плоских переизлучателей близок к зеркальному; вибраторы переизлучают энергию приблизительно равномерно во всех направлениях вокруг своей оси. В тех случаях, когда в направлении основной трассы точка хорошо «защищена» (лесом, экраном), близко расположенные радиоотражающие объекты снижают объемную контрастность поля и в некоторых случаях могут увеличить уровень поля в тени в несколько раз.

Расчет трассы, тем более закрытой, следует всегда начинать с построения профиля местности в заданном направлении и определения возможных переотражений. Это позволит правильно определить необходимый объект расчета и избежать грубых промахов.

5.2.6. Экспериментальное определение влияния трассы. Наиболее точно определить влияние трассы можно только с помощью эксперимента, который следует провести задолго до включения станции на излучение и даже до ее строительства. Во время измерений достаточно

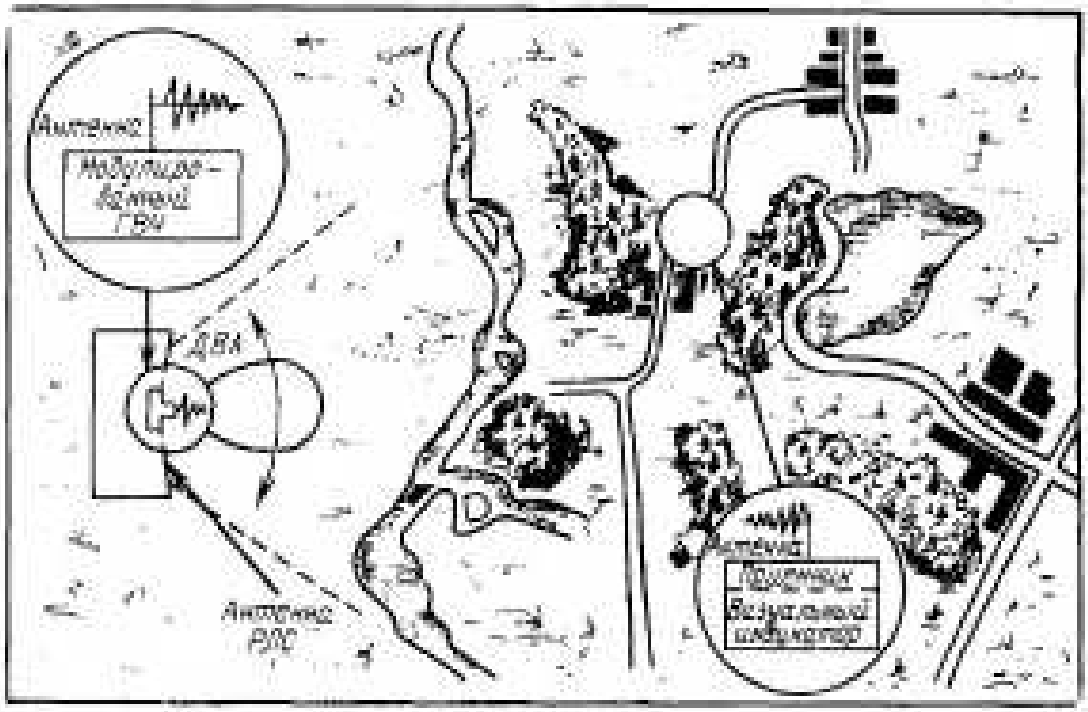


Рис. 5.2.8. При определении влияния распространения и распределения поля на больших площадях вблизи строящихся станций применяются вспомогательные маломощные излучатели и измерительные приемники с визуальной индикацией (ДВА — диаграмма излучения вспомогательной передающей антенны).

эффективным является использование следующей системы: маломощный генератор — простейшая излучающая антенна — измерительный приемник (рис. 5.2.8). Вся система должна работать на частоте, близкой к рабочей частоте станции. *Генератор* включается в режим модулированных колебаний лучше всего с частотой, отличной от 400 и 1 000 Гц (для лучшего опознавания в процессе работы с чувствительным приемником). Мощность генератора должна составлять единицы или доли ватта. *Антенна* — любого типа, но обязательно с достаточно широкой диаграммой направленности (десятки градусов). Это нужно для того, чтобы при проезде с приемником по территории в пределах большого сектора точки измерения не выходили за пределы диаграммы направленности передающей антенны по уровню $\pm 2 \ldots 3$ дБ. В противном случае антенну необходимо постоянно покачивать или применять несколько антенн и генераторов или учитывать диаграмму при калибровке с последующим измерением углов пунктов по карте. Антенна с генератором устанавливается в месте, соответствующем центру или верхнему краю антенны РЛС.

Приемник может быть любого типа, но обязательно с батарейным или аккумуляторным питанием, чувствительностью $10^{-10} \ldots 10^{-14}$ Вт. При отсутствии в приемнике устройства визуального отсчета на его выход включается специально изготовленный индикатор одного (отсчетного) уровня, например на электронно-оптической лампе (типа 6Е5С, 6Е1П и т. п.). Если передающая антенна сканирует, индикатор приемника должен иметь устройство для пиковой индикации сигнала, например, на диодно-емкостной ячейке. Для отсчета затуханий, если в приемнике отсутствует специальный аттенюатор,

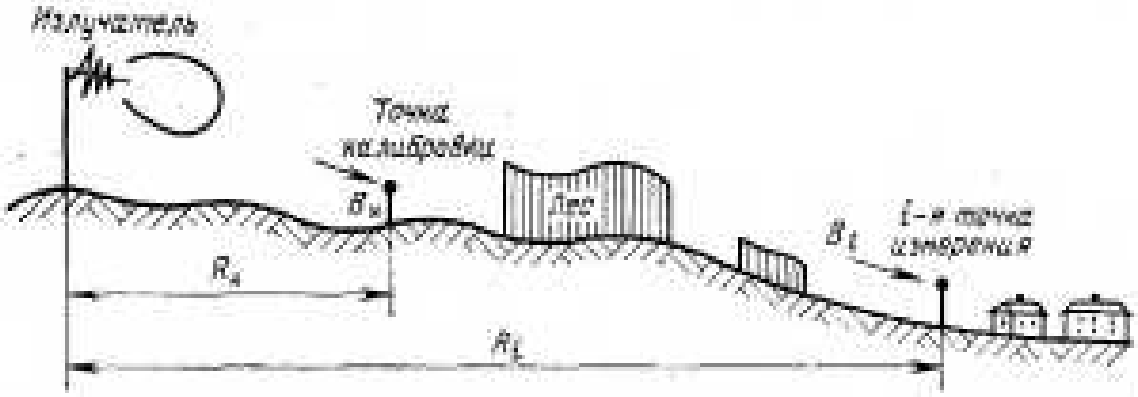


Рис. 5.29. К определению влияния местности с помощью вспомогательного излучателя.

используется регулятор чувствительности приемника, для чего он предварительно градуируется (в децибелах). Однако лучшие результаты может дать специальный ВЧ — СВЧ аттенюатор, включаемый между антенной приемника и его входом. Приемник должен иметь антенну, например, типа штырь, устанавливаемую над кузовом используемой при измерениях автомашины.

При проверке трассы в зоне излучателя с линейной поляризацией измерения проводятся при заданном наклоне поляризации; если поляризация волны излучателя круговая, — при вертикальном и горизонтальном наклонах раздельно. При измерениях на типовых трассах средней полосы России прогноз влияния трассы описываемым способом можно проводить на расстояниях до 10 ... 20 км.

Методика обработки результатов измерений затухания трассы заключается в выделении отклонения закона распределения плотности мощности реального поля от квадратичного. Таким образом, поправка к расчетному

значению поля, найденному с помощью обычных методов расчета без учета влияния местных предметов и трассы, определяется следующим образом:

$$\bar{B} = (r_к/R_i)^2 \operatorname{antilg} 0{,}1\,(B_к - B_i)$$

или

$$B_{дБ} = B_к - B_i - 20\lg\,(R_i/r),$$

где $r_к$ и R_i — соответственно расстояния калибровки и измерения (рис. 5.2.9), $B_к$ и B_i — показания регулятора чувствительности приемника, соответствующие калибровке и затуханию на трассе (в дБ). Калибровка проводится на малых расстояниях, когда влиянием трассы можно явно пренебречь.

Таблица 5.2.1

Типичные данные прогноза поля в населенных пунктах с учетом экспериментальных данных о трассе

Населенный пункт	Расстояние, км	Затухание B, дБ	ППМ, мкВ/см			Ошибка расчета, дБ
			расчет по ВДИ	прогноз с учетом B	измерение	
А	1,8	27	750	15	15	0
Б	2,5	5	700	1280	800	2
В	4,3	9	300	370	80	6,6
Г	4,9	13	250	125	50	4
Д	7,1	20...18	150	15...24	10	(1,8...3,8)
Е	8,2	18	110	17,3	5	5,3
Ж	9,3	13	80	40	15	4,3

Значения $\bar{B} < 1$ соответствуют усилению энергии на трассе, обычный случай $\bar{B} > 1$ — ослаблению. Пример расчета ППМ с учетом измеренного затухания трассы показан в табл. 5.2.1.

Из таблицы видно, что условия прохождения энергии по трассе оказывают значительное, если не сказать решающее, влияние на облучаемость местности, причем расстояние, как правило, менее всего определяет это влияние. Действительно, пункт Ж, находящийся на расстоянии 9,3 км, имеет дополнительное (к квадрату изменения энергии в свободном пространстве) затухание всего 13 дБ, а пункт $А$ — 27 дБ. В данном случае это объясняется двумя причинами: наличием на трассе ши-

рокой полосы леса и, главное, нахождением пункта *А* во впадине. Разброс величин затухания (и ППМ) в одном пункте объясняются сильными колебаниями поля в пределах территории пункта из-за влияния местных условий (большие здания, наличие коридоров распространения волны по просекам и т. п.). Таблица также показывает достаточно хорошее совпадение данных расчета при использовании обычных формул Р-метода и эксперимента, если учет трассы проведен с необходимой тщательностью.

Итак, методика измерения затухания трассы * состоит в следующем.

Подготовка к измерениям

1. Выбор элементов системы измерений:

Генератор мощностью 0,1 ... 10 Вт с заданным диапазоном частот, с характерной модуляцией, четко опознаваемой на фоне работы других станций.

Антенна передатчика с гладкой и достаточно широкой диаграммой; возможно с устройством сканирования в горизонтальной плоскости.

Приемник чувствительностью 10^{-13} ... 10^{-14} Вт, с возможностью перестройки в некотором диапазоне частот; встроенной или отдельной системой визуальной индикации (лучше по линковому уровню); крайне желательно с батарейным или аккумуляторным питанием. Для отсчета уровня могут быть использованы органы регулировки чувствительности приемника (предварительно градуированные в децибелах) или специальный аттенюатор, устанавливаемый на входе.

Антенна приемника (штырь, логопериодическая антенна, рупор и т. п.) укрепляется на кузове автомашины с возможностью поворота ее в горизонтальном направлении.

2. Подготовка места передатчика: проводка электрического кабеля, механическая установка антенны и генератора и оборудование места оператора (оно должно быть достаточно защищено от неблагоприятных погодных и климатических условий).

3. Определение по карте и на местности путей подъезда к намечаемым точкам измерения.

4. Выбор средств сигнализации между пунктами приема и передачи (ракетница, радиостанции, использование имеющейся телефонной сети в пунктах измерения и т. п.).

Работа

1. Задача оператора на передающем конце — обеспечить достаточную стабильность и непрерывность работы генератора. По команде или в условленное время антенну при необходимости покачивают.

2. Задача оператора на приемном конце — поиск максимума

---

* Окончательный вариант методики разработан совместно с В. И. Кравошкиным, В. С. Блументалем и И. П. Кичаевой.

уровня сигнала в выбранной точке измерения путем подстройки антенны по направлению и приемника по частоте и отсчет показаний по шкале аттенюатора (при установке индикатора на заданный уровень).

В § 5.2 мы рассмотрели в основном методы проведения второго очень важного этапа системы контроля радиобезопасности (СПКР, см. § 4.1). Как показывает опыт, наиболее точным и надежным из них является метод, основанный на определении свойств местности с помощью вспомогательного излучателя (п. 5.2.6). Иногда после второго этапа для уточнения ожидают окончательного включения РТС и проводят измерения ППМ на местности в реальных условиях работы излучателя. Но иногда, если разрыв во времени между строительством антенны и наладкой передатчика достаточно большой, вместо собственного генератора РТС на вход антенны подключают маломощный генератор и дополнительно с помощью чувствительного приемника уточняют распределение поля на местности — уже с учетом конкретных характеристик антенны РТС. Этот, третий, этап СПКР проводится в соответствии с конкретными возможностями и подробно здесь не описывается.

Расчетные методы определения временны́х параметров воздействующего поля, которые будут рассмотрены в следующем параграфе, служат также прогнозу биологической опасности. Они могут быть использованы при обычном методе нормирования — по уровню и совершенно необходимы для прогноза при нормировании по дозе.

5.3. УЧЕТ ВРЕМЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОПОЛЕЙ РТС С ПЕРЕМЕЩАЮЩИМИСЯ ДИАГРАММАМИ ИЗЛУЧЕНИЯ

В гл. 3 при обсуждении способов нормирования воздействий мы отметили, что фактор времени является дополнительным важным параметром воздействующего поля. Этот фактор в простейшем виде учтен в существующих нормативах, но более полно и точно может быть выражен через понятие «плотности падающей дозы», или просто «дозы», связывающей неразрывно плотность мощности и время.

Мы рассмотрим некоторые практические случаи учета времени воздействия на точечный биообъект периодических облучений. Полученные данные могут быть использованы для расчета плотности падающей дозы

или мощности дозы (если характеризуется потенциальная опасность периодически воздействующих излучений), а также средних ППМ и времени воздействия при оценке поля по нормативам, нормирующим раздельно уровень поля и время.

Расчет времени воздействия проводится по уровню 0,5 от максимального ППМ; за пределами этого значения интенсивность поля считается равной нулю, а внутри ППМ постоянна и равна максимальному значению. Это допущение аналогично допущению равенства площадей S' и $S''=S''_0+S''_1+S''_2+\ldots$ (рис. 5.3.1). Нетрудно

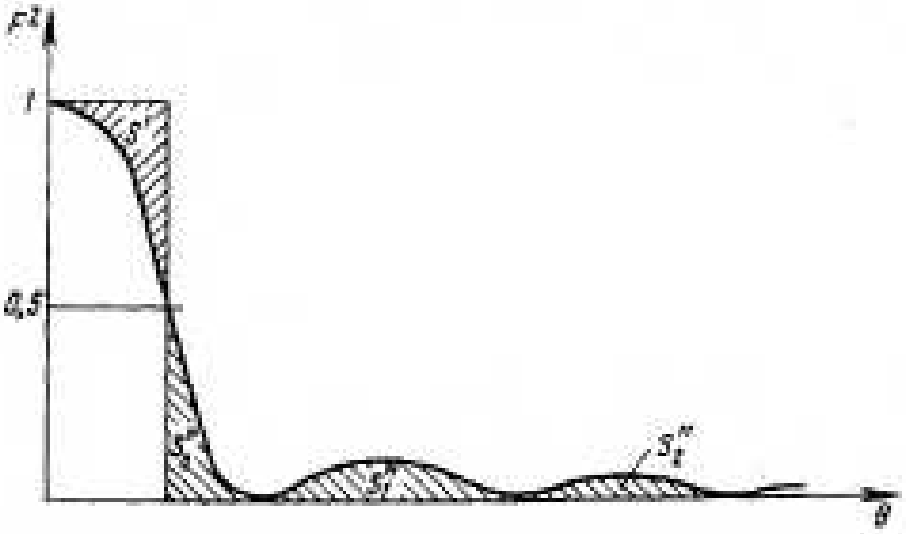


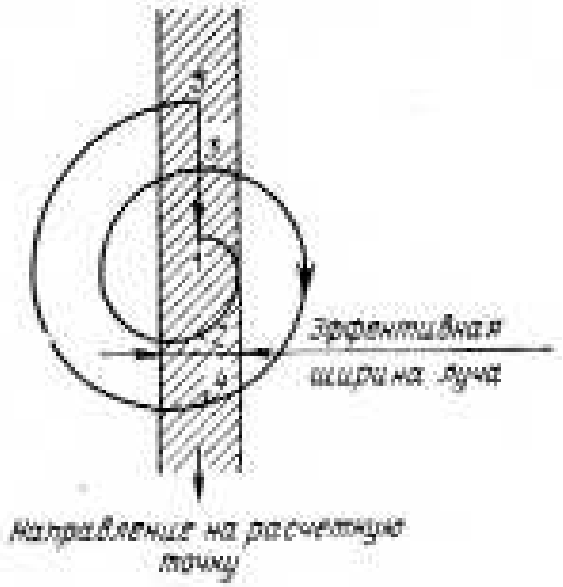
Рис. 5.3.1. При расчетах времени воздействия луча предполагается $S'=S''_0+S''_1+S''_2+\ldots$

показать, что для широкого класса антенн равенство будет соблюдаться с отличием 1 ... 2 дБ. Считая, что реальная точность расчета временных параметров облучения не превосходит этих величин, для простоты расчета оставим это допущение в силе.

Расчет энергетических и временны́х параметров поля при непериодическом воздействии (например, программный обзор пространства) при невыделенном облучении (большая изрезанность диаграммы, неглубокие минимумы) затруднителен, и в этом случае приходится прибегать к измерениям (или пользоваться приближенными методами на основании расчетных ППМ и предполагаемых временны́х характеристик воздействия).

Итак, при расчете ограничимся определением двух параметров прерывистого излучения: средней за время непосредственного воздействия ППМ $\Pi_{ср}$ и скважности воздействия γ. При наличии этих параметров облучения можно сравнить облучающее поле по существующим сейчас нормативам раздельно по ППМ и времени, а так-

же пересчитать их при необходимости в дозу. Вообще говоря, при определении $П_{ср}$ и γ требуется индивидуальный учет особенностей воздействия поля в каждом конкретном случае, лучше всего учитываемом с помощью дозиметров. Однако опыт показывает, что временные параметры можно учесть расчетным путем, при этом большинство практически используемых вариантов облучения может быть объединено в сходные по методике расчета группы. Несколько из них будут рассмотрены ниже.



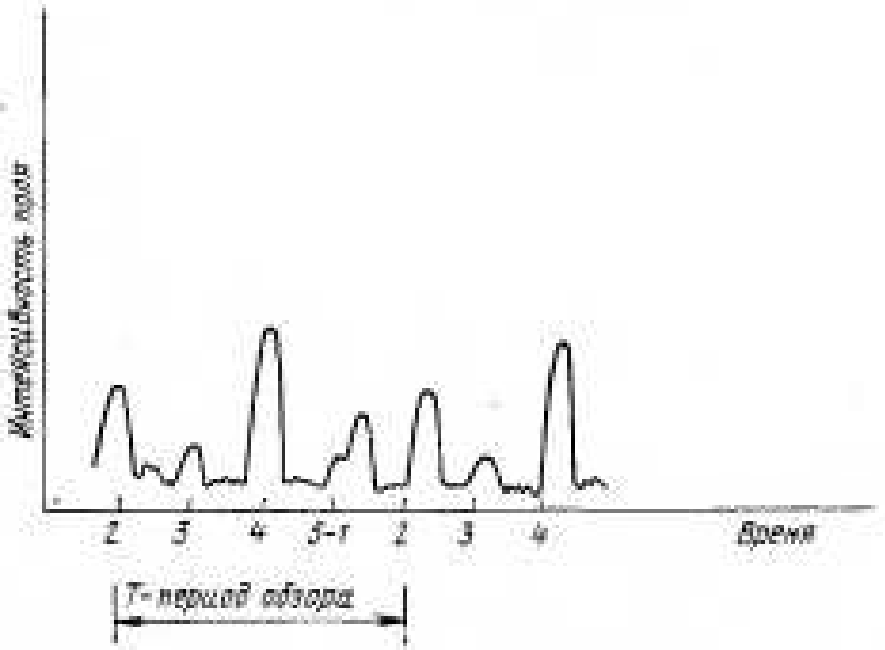


Рис. 5.3.2. Характер воздействия поля при обзоре по спирали (1, 2 . . . — номер витка при обзоре).

5.3.1. Понятие скважности воздействия. При периодическом воздействии можно воспользоваться понятием мощности дозы M и попытаться определить ее через скважность воздействия. Под скважностью воздействия γ будем понимать отношение времени воздействия $T_{возд}$ поля по уровню 0,5 плотности мощности к общему пери-

оду изменения облучения T:

$$\gamma = T_{возд}/T. \qquad (5.3.1)$$

Если воспользоваться выражениями (3.2.4) и (3.2.7), то для общего случая можно записать:

$$\gamma = \int_0^T \Pi(t)\,dt/\Pi_{макс}T. \qquad (5.3.2)$$

В некоторых случаях, например при сканировании по кольцу или по спирали, за время T происходит периодическое изменение интенсивности (рис. 5.3.2). В этом случае приходится воспользоваться понятием *средней* ППМ:

$$\Pi_{ср} = \frac{1}{N}(\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \ldots + \Pi_N), \qquad (5.3.3)$$

где N — количество воздействий за время T; Π_1, Π_2 — плотность мощности в каждый момент облучения. Тогда в выражении для мощности дозы и дозы подставляется вместо $\Pi_{макс}$ величина $\Pi_{ср}$.

5.3.2. **Воздействие осевого поля.** В простейшем случае воздействия осевого поля в дальней зоне скважность

$$\gamma_0 = 2\theta_{0,5}/\alpha, \qquad (5.3.4)$$

если сканирование происходит в вертикальной плоскости (угломестный сканер) или

$$\gamma_0 = 2\varphi_{0,5}/\alpha, \qquad (5.3.5)$$

если сканирование — в горизонтальной плоскости (азимутальный сканер). Здесь α — сектор сканирования (рис. 5.3.3).

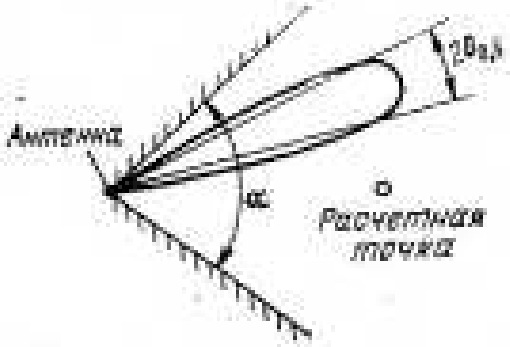


Рис. 5.3.3. К расчету скважности воздействия осевого дальнего поля.

С приближением к антенне появляется «дефокусировка» или угловое расширение антенного луча (см. § 4.2), которую проще всего учесть с помощью коэффициента дефокусировки B, изменяющего величину эффективного угла воздействия. Тогда

$$\gamma_0 = 2\theta_{0,5}/B_\theta \cdot \alpha = \theta_{эфф}/\alpha, \qquad (5.3.6)$$

или

$$\gamma_0 = 2\varphi_{0,5}/B_\varphi \cdot \alpha = \varphi_{эфф}/\alpha, \qquad (5.3.7)$$

где B_θ и B_φ — коэффициенты дефокусировки в плоскостях θ и φ, определяемые на основании графиков рис. 4.2.3–4.3.5 (§ 4.2); $\theta_{эфф}$ и $\varphi_{эфф}$ — эффективные углы воздействия.

5.3.3. Боковое поле азимутального сканера. Для прямоугольных апертур удаление точки наблюдения от оси в плоскости θ азимутального сканера фактически не сказывается на величине γ (т. е. $\gamma_{ап\,пр}=\gamma_0$), между тем для круглых апертур определение скважности несколько осложняется.

Задача состоит в определении эффективного угла луча круглой апертуры, сканирующего в горизонтальной плоскости. Эффективный угол $\theta_{эфф}=\theta_\pi$ (рис. 5.3.4) определяется углом перемещения антенны сканера, при котором ППМ уменьшается вдвое по сравнению с максимальной $П_{макс}$, зарегистрированной при положении луча в направлении на расчетную точку (на рисунке это положение показано сплошной линией; положение луча при отклонениях, соответствующих ППМ в расчетной точке $П=П_{макс}/2$ показано пунктиром, центр его занимает положение O' и O'').

Если перейти к приведенным углам $n=\theta/2\theta_{0,5}$ и воспользоваться выражением для хорды круга [13], можно записать (рис. 5.3.4)

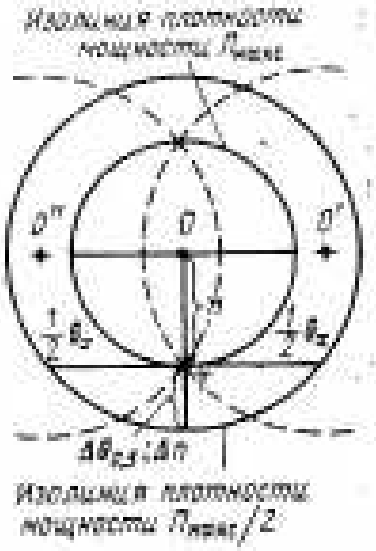


Рис 5.3.4. Эффективный угол луча круглой апертуры при азимутальном сканировании:
$Г$ — расчетная точка с максимальной ППМ, равной $П$. O, O', O'' — положения центра луча, сканирующего в горизонтальной плоскости. При перемещении луча на $\pm\theta_\pi/2$ ППМ уменьшается вдвое.

$$n_\pi = 2\sqrt{2(\Delta n)n' - (\Delta n)^2} = 2\sqrt{2(\Delta n)n + (\Delta n)^2}, \quad (5.3.8)$$

где $n=\theta_\pi/2\theta_{0,5}$, $\Delta n=\Delta\theta_{0,5}/2\theta_{0,5}$, $n'=n+\Delta n$.

Имея в виду (4.3.48), для $n>0{,}66$ можно записать

$$\frac{M(n')}{M(n)}=2=\left(\frac{n+\Delta n}{n}\right)^s. \quad (5.3.9)$$

где $s=(\delta_1-6{,}1)/4{,}02$.

Отсюда

$$1+\Delta n/n=2^{1/s} \qquad (5.3.10)$$

или

$$\Delta n=n\,(2^{1/s}-1). \qquad (5.3.11)$$

Тогда в дальней зоне эффективный приведенный угол

$$n_x=2n\sqrt{2^{2/s}-1}. \qquad (5.3.12)$$

Углы n отсчитываются из вершины, сдвинутой от обычной оси вращения антенны (приблизительно центр апертуры) на величину $R_{\text{а ц}}$. Учитывая это смещение, для азимутального сканера с круглой антенной апертурой можно записать

$$\gamma_{\text{аз кр}}=(2\theta_{0,5}/\alpha)\,nB_{\text{к}}\varkappa_{\text{аз кр}}, \qquad (5.3.13)$$

где $1/B_{\text{к}}=1+x_{\text{а ц}}/x=1+R_{\text{а ц}}/R$ учитывает уширение луча вследствие близости апертуры; $\varkappa_{\text{аз кр}}=n_x/n=2\sqrt{2^{2/s}-1}$ определяет отношение горизонтального эффективного угла (в плоскости сканирования) к углу вертикального отклонения расчетной точки от оси излучения. Формула справедлива для $n>0{,}66$.

5.3.4. Боковое поле угломестного сканера. Скважность воздействия поля при удалении точки наблюдения от оси в плоскости θ угломестного сканера с любыми антеннами для области боковых лепестков ($n>0{,}66$) в общем

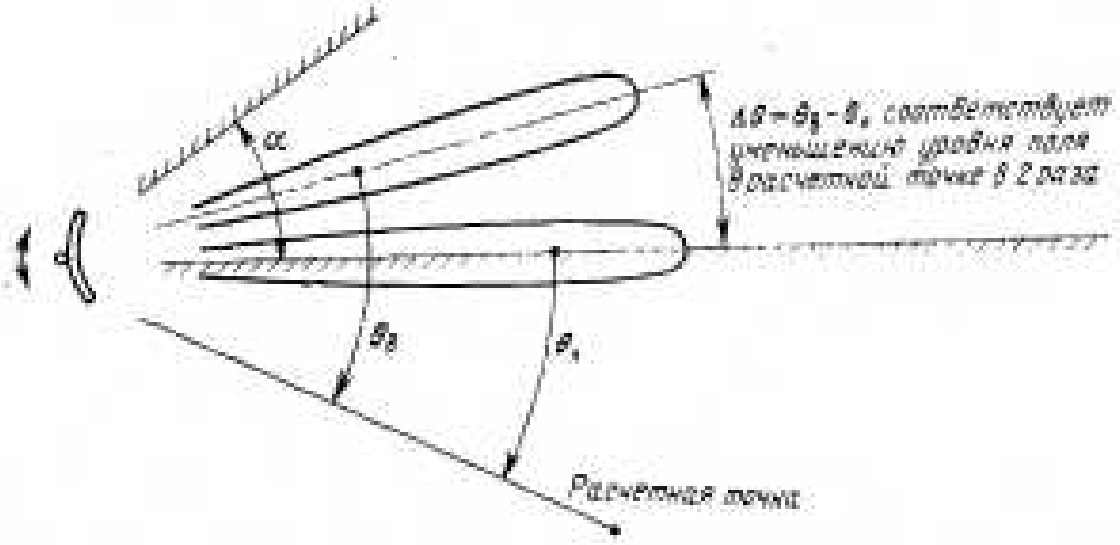


Рис. 5.3.5. К расчету скважности воздействия поля угломестного сканера.

случае определяется выражением

$$\gamma_y = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{min}+\alpha} F^2(\theta)\,d\theta / F^2(\theta_{min}) \qquad (5.3.14)$$

где $F(\theta)$ — диаграмма излучения антенны в плоскости θ; θ_{min} — угол, соответствующий нижнему положению антенны. По определению,

$$\gamma_y = \theta_{эфф}/\alpha = \Delta\theta/\alpha, \qquad (5.3.15)$$

где $\Delta\theta = (\theta_в - \theta_н)$ — разность между углами наклона антенны сканера, соответствующая уменьшению уровня поля на 3 дБ (рис. 5.3.5).

Воспользуясь выражением 5.3.11, учитывая дефокусировку луча, получаем

$$\gamma_y = \frac{2\theta_{0,5} B_н}{\alpha} n_н (2^{1/x} - 1), \qquad (5.3.16)$$

где $n_н$ — приведенный угол точки наблюдения в нижнем положении луча; $B_н = 1 + x_{з.ш}/x = 1 + R_{з.ш}/R$.

5.3.5. Обзор по кольцу. При обзоре пространства по кольцу с постоянной угловой скоростью ω линейная скорость перемещения проекции лепестка на плоскость земли v, а следовательно, и скважность воздействия на расчетную точку оказываются зависимыми от положения расчетной точки относительно центра сканирования $n_т/n_{см}$ (рис. 5.3.6). За период сканирования точка подвергается облучению дважды: в нижнем и верхнем положениях луча (для упрощения задачи считаем, что одна из главных плоскостей антенны совпадает с плоскостью горизонта), когда уровни плотности мощности, соответственно $П_в$ и $П_н$, будут определяться углами $\theta_в$ и $\theta_н$ и соответствующими им значениями масштабной функции $M_в$ и $M_н$.

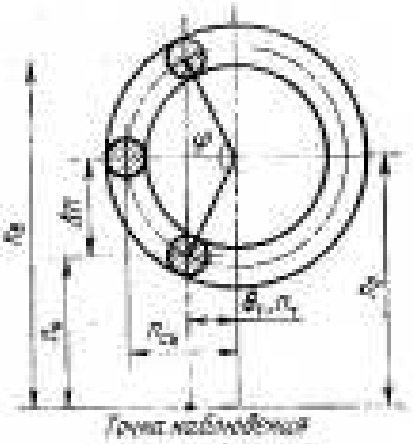


Рис. 5.3.6. Основные обозначения в расчетах при обзоре по кольцу (разрез сделан в плоскости перпендикулярно оси главного лепестка).

Случай воздействия поля при обзоре по кольцу можно трактовать как удвоенное время воздействия при средней плотности мощности

$$П^*_к = (П_в + П_н)/2. \qquad (5.3.17)$$

Если воспользоваться выражением (4.3.42), можно записать

$$\Pi^*_{\text{к}} = \frac{1}{2}(\Pi_{\text{н}} + \Pi_{\text{в}}) = \frac{\Pi_{\text{в}}}{2}\left[\frac{1}{M(n_{\text{н}})} + \frac{1}{M(n_{\text{в}})}\right] =$$

$$= \frac{\Pi_{\text{в}}}{M(n_{\text{в}})}\left[\left(\frac{n_0}{n_{\text{н}}}\right)^{\varkappa} + \left(\frac{n_0}{n_{\text{в}}}\right)^{\varkappa}\right]. \qquad (5.3.18)$$

Отношения $n_0/n_{\text{н}}$ и $n_0/n_{\text{в}}$ находятся в определенной зависимости от положения точки наблюдения, т. е. от отношения $n_{\text{т}}/n_{\text{см}}$ (рис. 5.3.6). Действительно, при $\theta_{\text{т}} = 0$ разница в уровнях поля в нижнем и верхнем положении луча наибольшая, при перемещении точки наблюдения из центра проекции сканирующего луча к периферии она уменьшается.

Представим $n_0/n_{\text{н}}$ как $n_0/(n_0 - \Delta n)$, где Δn может быть определено на основании общих геометрических соображений:

$$\Delta n = n_{\text{см}} \sin\frac{\psi}{2} = n_{\text{см}} \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{см}}}\right).$$

Тогда

$$\frac{n_{\text{н}}}{n_0} = 1 - \frac{n_{\text{см}}}{n_0} \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{см}}}\right). \qquad (5.3.19)$$

Аналогично определяем

$$\frac{n_{\text{в}}}{n_0} = 1 + \frac{n_{\text{см}}}{n_0} \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{см}}}\right). \qquad (5.3.20)$$

Имея в виду, что $\Pi_0/\overline{M}(n_0) = \Pi(n_0)$ — уровень поля при центральном положении луча, запишем

$$\Pi^*_{\text{к}} = \frac{\Pi(n_0)}{2}\left\{\left[1 + \frac{n_{\text{см}}}{n_0} \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{см}}}\right)\right]^{-\varkappa} + \right.$$

$$\left. + \left[1 - \frac{n_{\text{см}}}{n_0} \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{n_{\text{т}}}{n_{\text{см}}}\right)\right]^{-\varkappa}\right\}. \qquad (5.3.21)$$

Определим зависимость для выражения в фигурной скобке (обозначим его $2\varkappa_{\text{н}}$) от $n_{\text{см}}/n_0$ и δ_{t} для $\theta_{\text{т}} = 0$, соответствующего наибольшей средней плотности мощности

$$\varkappa_{\text{к}} = \frac{1}{2}\left[\left(1 + \frac{n_{\text{см}}}{n_0}\right)^{-\varkappa} + \left(1 - \frac{n_{\text{см}}}{n_0}\right)^{-\varkappa}\right]; \qquad (5.3.22)$$

тогда

$$П_к = П(n_0)\varkappa_н. \qquad (5.3.23а)$$

Это и есть *средняя плотность мощности* при сканировании по кольцу. Для углов сканирования $n_{ск}/n_0 \leqslant 0{,}1$ можно записать

$$П_к \approx П(n_0), \qquad (5.3.23б)$$

при этом ошибка не превышает 3 дБ.

Скважность воздействия поля при обзоре по кольцу может быть определена следующим образом (рис. 5.3.7):

$$\gamma_к = \Delta\psi/\pi, \qquad (5.3.24)$$

где $\Delta\psi = \frac{1}{2}(\psi' - \psi'')$; $\psi' = 2\arccos\left(1 - \frac{\theta'}{r}\right)$;

$$\psi'' = 2\arccos\left(1 - \frac{\theta''}{r}\right);$$

$$\theta' = \theta_{ск} + \theta_{эфф} - \theta_т; \quad \theta'' = \theta_{ск} - \theta_т.$$

Тогда

$$\gamma_к = \frac{1}{\pi}\left[\arccos\left(1 - \frac{\theta_{ск} + \theta_{эфф} - \theta_т}{\theta_{ск} + \frac{1}{2}\theta_{эфф}}\right)\right.$$

$$\left. - \arccos\left(1 - \frac{\theta_{ск} - \theta_т}{\theta_{ск} + \frac{1}{2}\theta_{эфф}}\right)\right].$$

После несложных преобразований получаем выражение для скважности воздействия поля на точку при обзоре пространства по кольцу:

$$\gamma_к = \frac{1}{\pi}\left[\arccos\frac{(2\theta_т/\theta_{эфф}) - 1}{(2\theta_{ск}/\theta_{эфф}) + 1} - \arccos\frac{(2\theta_т/\theta_{эфф}) + 1}{(2\theta_{ск}/\theta_{эфф}) + 1}\right]. \qquad (5.3.25)$$

При центральном положении точки наблюдения, т. е. $\theta_т = 0$, скважность наименьшая; для этого случая и следует проводить расчеты.

5.3.6. Обзор по спирали. При обзоре пространства по закону арифметической спирали (рис. 5.3.8) средняя за время воздействия плотность мощности

$$\Pi_{\text{сп}} = \frac{1}{2k_{\text{в}}} \sum_{-k_{\text{в}}}^{k_{\text{в}}} \Pi_{k_{\text{в}}} \qquad (5.3.26)$$

где $k_{\text{в}}$ — число витков спирали; $\Pi_k = \Pi_0 / \overline{M}(n_k)$, Π_k и n_k — плотность мощности и приведенный угол расчетной точки соответственно для k-го витка.

Для подсчета $\Pi_{\text{сп}}$ можно воспользоваться рассчитанными значениями $\Pi_{\text{к}}$ (5.3.21). Для $n_{\text{т}} = 0$

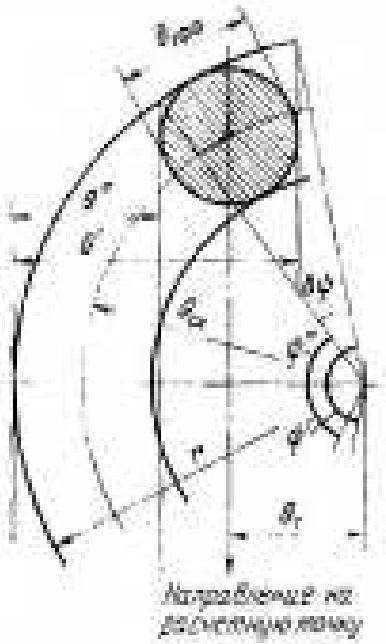


Рис. 5.3.7. К определению скважности при обзоре по кольцу.

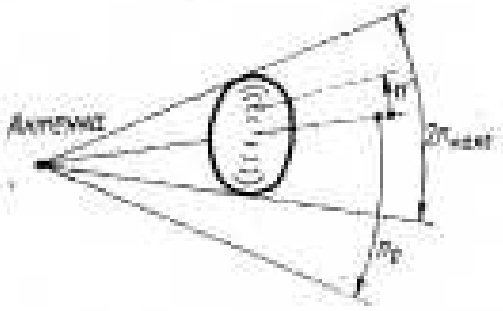


Рис. 5.3.8. К определению средней плотности мощности при сканировании по спирали.

(т. е. точка наблюдения находится в центре проекции сектора сканирования)

$$\Pi_{\text{сп}} = \frac{1}{2k_{\text{в}}} \sum_{k=0}^{k_{\text{в}}} \Pi_{\text{к}} \approx \frac{\Pi(n_0)}{2k_{\text{в}}} \sum_{k=0}^{k_{\text{в}}} \varkappa_{\text{к}} \left(\frac{n'_{\text{сп}}}{n_{\text{с}}} \right), \qquad (5.3.27)$$

где $\varkappa_{\text{к}}$ соответствует выражению (5.3.22); $n'_{\text{сп}}$ — текущее значение приведенного угла между направлением на точку наблюдения и витком k.

Имея в виду, что практически всегда сектор сканирования заполнен по крайней мере по уровню 0,5 (вне зависимости от закона заполнения, т. е. образуется

сплошной круг), выражение (5.3.27) можно переписать так:

$$\Pi_{\text{сц}} = \frac{\Pi(n_0)}{2} \int_0^1 \left[\left(1 + \xi \frac{n_{\text{макс}}}{n_0}\right)^{-s} + \left(1 - \xi \frac{n_{\text{макс}}}{n_0}\right)^{-s} \right] d\xi, \tag{5.3.28}$$

где $\xi = n_{\text{сц}}/n_{\text{макс}}$; $2n_{\text{макс}}$ — сектор сканирования; $0 \leqslant n' < n_{\text{макс}}$ (рис. 5.3.8).

Обозначим значения интеграла в выражении (5.3.28) через $2\varkappa_{\text{сп}}$. Тогда *средняя* за время воздействия ППМ в точке $\theta_{\text{т п}} = 0$ будет

$$\Pi_{\text{сп}} = \Pi(n_0)\varkappa_{\text{сп}}. \tag{5.3.29}$$

Следует отметить, что во время сканирования при движении луча из центра к периферии сектора сканирования почти никогда уровень первого бокового лепестка не остается постоянным. Поэтому при расчете следует вводить эту зависимость уровня первого бокового лепестка от положения луча $\delta_1 = \delta_1(\frac{n}{n_0})$, которая, если заданы значения δ_1 в центре ($\delta_{1\text{ц}}$) и на краях ($\delta_{1\text{кр}}$), может быть аппроксимирована, например, функцией типа

$$\overline{\delta}_1(\xi) = \overline{\delta}_{1\text{ц}} + (\overline{\delta}_{1\text{кр}} - \overline{\delta}_{1\text{ц}})\xi \tag{5.3.30}$$

(здесь $\overline{\delta}_1$ — в натуральных отношениях).

Можно предположить еще более сложный случай: когда функции измерения уровня первого бокового лепестка «вверх» и «вниз» неодинаковы, тогда приходится вводить непосредственно в выражение (5.3.28) разные зависимости $\delta_1(\frac{n}{n_0})$ для первого и второго членов подынтегрального выражения.

Скважность воздействия для круговых заполненных разверток (типа спиралей) приближенно можно определить как отношение $S_{\text{эфф}}/S_{\text{сп}}$ (рис. 5.3.9), где $S_{\text{эфф}} \approx \approx \theta_{\text{эфф}}\theta_{\text{х}}$; $\theta_{\text{сп}} = \pi\theta^2_{\text{сп}}$. Длина хорды $\theta_{\text{х}} = 2\theta_{\text{сп}} \sin \psi/2$, т.е.

$$\gamma_{\text{сп}} = \frac{2\theta_{\text{сп}}\theta_{\text{эфф}} \sin\frac{\psi}{2}}{\pi\theta^2_{\text{сп}}} = \frac{2}{\pi}\frac{\theta_{\text{эфф}}}{\theta_{\text{сп}}} \sin\frac{\psi}{2}, \tag{5.3.31}$$

где $\psi = \pi(1 - n_{\text{т}}/n_{\text{сп}})$; $n_{\text{т}}$ — приведенное угловое расстояние между центром сектора сканирования и направлением на расчетную точку.

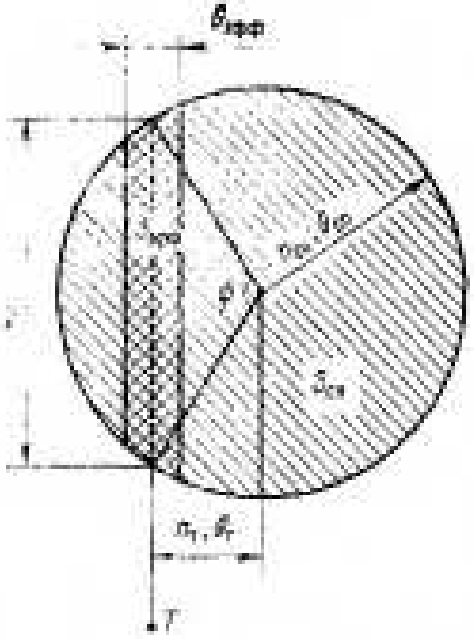


Рис. 5.3.9. Нормальный разрез сектора сканирования с точкой наблюдения в плоскости разреза.

При центральном положении облучаемого объекта $\psi = \pi$, и формула (5.3.31) принимает вид

$$\gamma_{сп} = (2/\pi)(\theta_{эфф}/\theta_{сп}). \quad (5.3.32)$$

5.3.7. Строчные методы обзора. При строчных, или «кадровых» методах обзора, как правило, применяются горизонтальная строка и вертикальная кадровая развертка.

При сканировании по кадру обычно известна максимальная ППМ при самом нижнем положении луча $\Pi(n_1)$, сектор сканирования в горизонтальной плоскости α и общее за кадр число горизонтальных сканирований N. Общая скважность воздействия поля (понятие, несколько отличное от понятия скважности по времени) [см. выражение (5.3.1)] $\gamma_{кадр} = \Pi_{ср}/\Pi(n_1)$ будет зависеть от вертикального и горизонтального движения луча.

Представим $\gamma_{кадр}$ как функцию с разделяющимися переменными, т. е. $\gamma_{кадр} = \gamma^{(\delta)}\gamma^{(\varphi)}$, где $\gamma^{(\varphi)} = \gamma_\delta$ [см. (5.3.7)], а

$$\gamma^{(\delta)} = \Pi^*_\delta/\Pi(n_1). \quad (5.3.33)$$

При $\gamma^{(\delta)} = 1$, т. е. при сканировании по одной строке $\gamma_{кадр} = \gamma^{(\varphi)} = \gamma_\delta$.

Средняя за время всех воздействий луча, находящегося „над головой" (т. е. когда точка наблюдения находится в проекции луча) плотность мощности Π^*_δ может быть определена прямым путем:

$$\Pi^*_\delta = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N}\Pi(n_{кадр}), \quad (5.3.34)$$

имея в виду, что $0 \leqslant n_{кадр} \leqslant N$; N — количество строк.

Определение $\Pi^*_{стр}$ можно упростить, если принять что влиянием строк выше 3-й можно пренебречь (угло-

местное расстояние между строками обычно не менее ширины диаграммы направленности антенны, т. е. при нахождении луча на 4-й и выше строках интенсивность боковых излучений оказывается незначительной); тогда

$$\gamma^{(\delta)}=\frac{\Pi^*_{\text{в}}}{\Pi(n_1)}=\frac{1}{N\Pi(n_1)}\left[N_1\Pi(n_1)+N_2\Pi(n_2)+N_3\Pi(n_3)\right]=$$

$$=\frac{1}{N}\left[N_1+N_2\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^4+N_3\left(\frac{n_1}{n_3}\right)^4\right], \qquad (5.3.35)$$

где Π_1, Π_2, Π_3 — плотность мощности в точке наблюдения при прохождении 1-, 2- и 3-й строк с приведенными углами n_1, n_2, n_3 относительно точки наблюдения, N_1, N_2, N_3 — количество обзоров за кадр по 1-, 2- и 3-й строкам.

Таким образом, с учетом выражений (5.3.7) и (5.3.35) величина средней ППМ при кадровом обзоре пространства может быть определена так:

$$\Pi_{\text{ср}}=\Pi(n_1)\gamma^{(\delta)}\gamma^{(\varphi)}. \qquad (5.3.36)$$

5.3.8. О программном обзоре. При программном обзоре понятия скважности и средней плотности мощности не характерны, и при прогнозах приходится пользоваться вероятностными значениями времени облучения и ППМ, получаемыми на основании предполагаемой обстановки.

5.3.9. Применение расчетов скважности для решения конкретных задач прогноза. При решении конкретных задач можно интересоваться либо раздельно средней за время воздействия величиной плотности мощности Π^* и скважностью воздействия γ (пример ВДИ, построенной с учетом этих данных, приведен на рис. 5.1.2), которая позволяет найти время воздействия $T_{\text{возд}}$ в течение всего времени работы РТС T [см. формулу (5.3.1)], либо их произведением, определяющим мощность дозы:

$$M=\gamma\Pi^*. \qquad (5.3.37)$$

Пример ВДИ с расчетом M для сканирующей РТС приведен на рис. 5.3.10. В любом случае, при необходимости,

можно определить плотность падающей дозы за время T:

$$D = \Pi^* \gamma T = MT. \qquad (5.3.38)$$

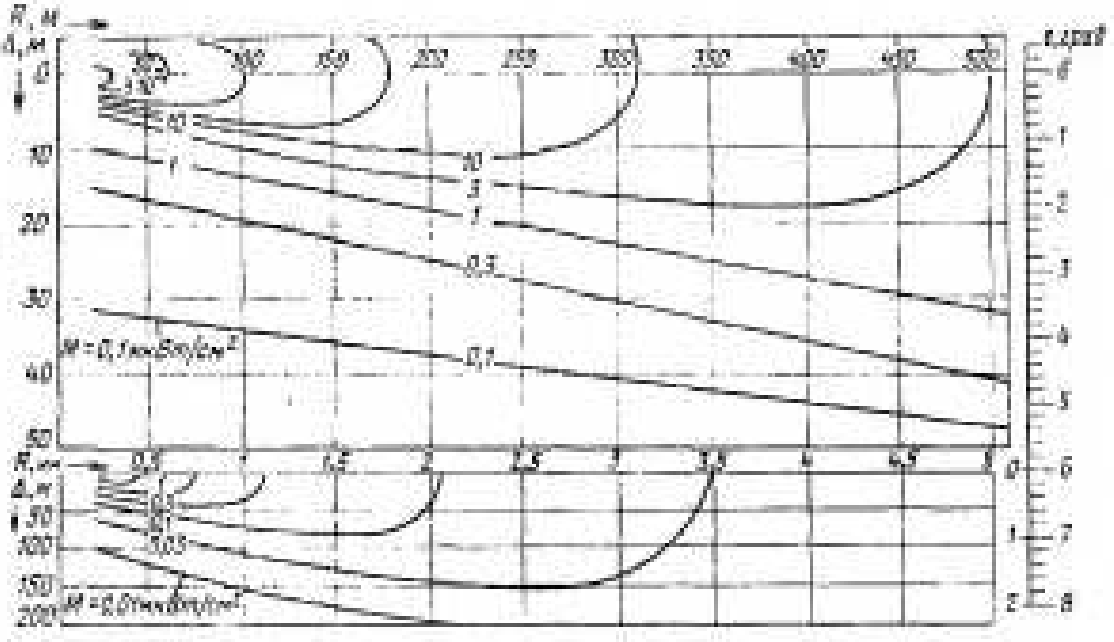


Рис. 5.3.10. Пример построения ВДИ по данным мощности дозы.

Практика радиопрогноза включает в себя, прежде всего, использование методов расчета поля в свободном пространстве, учет влияния земли и местных предметов, а также охватывает ряд случаев, которые обычно не могут быть учтены точными методами. К таким случаям следует отнести прогноз поля в зоне действия косеканс-квадратных диаграмм, расчет поля вне главных плоскостей антенн, а также поля несимметрично возбужденных апертур и антенн с перемещающимися диаграммами направленности.

Учет влияния земли и местных предметов является вторым, достаточно важным этапом СПКР. Третий этап — уточнение данных расчета поля в свободном пространстве и учета влияния местности путем измерения поля чувствительным приемником в зоне излучения построенной антенны, работающей от маломощного передатчика — здесь не приводится.

Обзор методов и средств радиометрии — четвертого, заключительного этапа СПКР — сделан в следующей главе.

6. ТЕХНИКА РАДИОИЗМЕРЕНИЙ. АППАРАТУРА И МЕТОДЫ

Несмотря на большой объем информации и достаточную для радиогигиены точность, расчет поля не может заменить измерения по крайней мере в следующих случаях:

— при вынесении ответственного решения о сносе крупных населенных пунктов;

— при оценке биологической опасности в условиях сложного формирования поля (особые диаграммы антенн и т. п.);

— при коррекции расчета ВДИ серийных станций.

Задачи современной *радиометрии*, или *техники измерения основных параметров радиоизлучений*, — это инструментальное определение энергетических и временных характеристик поля, в совокупности определяющих его биологическую активность. Пока лучше всего разработаны методы и аппаратура измерения энергетических параметров поля — плотности потока падающей мощности, а также величины электрической и магнитной составляющих*. Приборы для измерения в явном виде временны́х параметров воздействия пока не разработаны, и в практических работах вместо них, как правило, используются устройства, учитывающие этот параметр автоматически: дозиметры (регистрирующие накопленную дозу) и измерители мощности дозы (см. п. 3.2.2).

В соответствии с назначением радиометров их можно разделить на следующие группы.

1. Аппаратура оповещения персонала об опасности. Это могут быть индикаторы поля, дозиметры, если они выполнены с устройствами автоматической сигнализации (например, индикатор и дозиметры СВЧ, разработанные в Институте физических проблем АН СССР [22]).

2. Контрольные приборы, предназначенные для регулярного контроля превышения нормируемых параметров — обычно интенсиметры*, измеряющие ППМ, напряженность электрической и магнитной составляющих поля по средним или пиковым значениям амплитуды напряженности полей (в дальнейшем мы увидим, что в диапазоне СВЧ удается сочетать все эти виды измерений, применяя измерители пикового уровня лишь одной составляющей — магнитной). Примером

---

* В общем случае называемых ниже интенсиметрами или измерителями поля. Напомним, что здесь понятие «интенсивность», если нет особой оговорки, соответствует понятию «величина ППМ» или «напряженность одной из составляющих поля».

контрольного измерителя поля может служить разработанный в США прибор 8686В1 [84].

3. Инспекторские и исследовательские приборы — интенсиметры (и дозиметры), предназначенные для широкого круга научных, производственных и инспекторских работ. Эти приборы во многом подобны приборам контрольной группы, но имеют больший динамический диапазон и лучшую точность; они не приспособлены для массовых измерений. В настоящее время проведение некоторых подобных работ удается значительно упростить и даже автоматизировать. Примером универсального измерителя поля может служить комплект аппаратуры ПО-1, которую часто неверно используют для контрольных работ.

4. Аппаратура узкоспециального назначения (например, для автоматического или полуавтоматического снятия вертикального разреза поля антенн в целях прогнозирования биологической опасности в строящихся зданиях, на летательных объектах и т. п.). Аппаратура этой группы серийно не выпускается, и для подобных работ чаще всего применяют видоизмененные измерители второй или третьей групп.

Сегодня существует широкий ассортимент аппаратуры для измерения уровней радиоизлучений СВЧ, используемой при решении самых различных задач (антенные измерения, служба радиоконтроля и т. п.), однако, как ни странно, достаточно освоенными можно считать только крайние участки диапазона интенсивностей: очень больших, порядка 10^{-4} ... 10 Вт/см^2, и очень малых, порядка 10^{-16} ... 10^{-10} Вт/см^2 и менее. Эти области обслуживаются аппаратурой, построенной на совершенно различных принципах (первые обычно используют тепловые методы детектирования, вторые — супергетеродинный прием). Соответственно реализуются разные точности (± 50 ... 30% и ± 4 .. 8 дБ соответственно) и инерционность (10^{-2} ... 10 и 10^{-5} ... 10^{-6} с).

Приборы, предназначенные для защиты человека, занимают промежуточное положение почти по всем показателям, и этот диапазон интенсивностей, как оказывается, наименее всего освоен. Существующие приборы этой группы, как правило, используют тепловые методы детектирования, поэтому для повышения реальной чувствительности в них приходится применять большие по размерам антенны «классического» типа, ограничивающие возможность измерений вблизи радиоотражающих поверхностей (внутри помещений, у шкафов с аппаратурой и т. д.).

К недостаткам измерителей поля с тепловыми детекторами можно отнести и их высокую инерционность. Появление электронного сканирования в технике излу-

чающих антенн, повышение требований к скорости обследования облучаемости больших территорий ставит вопрос о снижении инерционности (времени установления показаний) измерителей до значений 10^{-6} ... 10^{-4} с, которые известными тепловыми методами реализовать пока не удается.

Аппаратура, постепенно заполняющая существующий пробел, построена в основном на использовании мощных полупроводниковых диодов, малоинерционных индикаторов и к тому же обладает необходимыми показателями при малых габаритах и массе. Особо перспективными в этом отношении являются дозиметры СВЧ энергии, применяемые для массового индивидуального контроля.

Ниже мы вкратце рассмотрим основные принципы, используемые в радиометрии полей СВЧ, потенциально опасных для человека, функциональные и конструктивные особенности приборов, а также основные правила их применения в технике измерений. Большое внимание в этой главе будет уделено описанию экспериментальных моделей приборов и приборов, которые нашли применение на предприятиях отдельных ведомств (например, типа ИП-3425, ИП-3445, все дозиметры, приборы разработки Института физических проблем АН СССР и т. д.). Такое внимание вполне оправдано, так как многие из них являются перспективными и в самое короткое время, очевидно, получат распространение.

В п. 1.2.2 мы коснулись вопроса об электромагнитной структуре полей, представляющих опасность для организма человека. Мы увидели, что поле в свободном пространстве на большом расстоянии от излучателя является бегущим и для его оценки достаточно измерить любой из параметров: Π, E или H. В замкнутых объемах, а также, например, вблизи от больших антенн независимые от координат в свободном пространстве соотношения между этими параметрами нарушаются, так что измерителями ППМ можно пользоваться с большими оговорками. Вблизи излучателей результаты измерений ППМ можно применять только после соответствующих пересчетов. В двух последних случаях наиболее полную оценку биологической опасности могут дать только измерения как E, так и H. Такие измерения технически довольно трудны, и поэтому на практике измеряют один параметр. Выполнение измерителей поля с магнитными зондами оправдано тем, что поле такого

распространенного источника внутренних полей, как щель, имеет паражешную магнитную структуру; кроме того, как мы увидим ниже, реализация магнитных зондов с устойчивыми характеристиками в интересующем нас диапазоне оказывается задачей технически легко выполнимой.

6.1. МЕТОДЫ И АППАРАТУРА ИНТЕНСИМЕТРИИ СВЧ ПОЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНЫХ УРОВНЕЙ

Измерение энергетических параметров воздействующего поля, интенсиметрия, как неразрывное целое включает в себя следующие фазы: прием энергии поля, детектирование, т. е. преобразование выходного сигнала зонда в форму, удобную для дальнейшей обработки его усиление (если это оказывается необходимым) и регистрация.

6.1.1. Параметры интенсиметрической аппаратуры. Наиболее важные из них следующие.

1. Диапазон длин волн должен соответствовать тому участку диапазона СВЧ, который используется в технике генерации достаточно высоких мощностей. Даже беглое рассмотрение занятости спектра СВЧ подобными установками (см. п. 1.2.1) убеждает нас в том, что участков спектра, свободных от возможного облучения человека мощными полями, к настоящему времени фактически нет. Некоторое исключение составляет участок СВЧ диапазона выше 3 ГГц, где самолетные и судовые радиолокаторы занимают сравнительно узкие участка. Поэтому здесь допустима разработка узкополосных измерителей, тем более что широкополосная аппаратура для этого участка спектра сложна и дорога.

2. Чувствительность аппаратуры полностью определяется нормированными уровнями. В соответствии с нормативами США, поля с уровнем ниже 100 мкВт/см^2 измерять считается нецелесообразным, и вся американская интенсиметрическая аппаратура строится из расчета измерения уровня не ниже этого значения; обычными также являются измерители с основным показанием 10 мВт/см^2 и регистрацией небольшого отклонения (2...4 дБ) за пределами этого значения. В соответствии

с сегодняшними отечественными нормативами, минимальный уровень, подлежащий измерению, равен 10 мкВт/см² и с учетом намечаемой тенденции нормативов для населения — 1 мкВт/см².

3. Термин «динамический диапазон» (ДД) аппаратуры включает в себя по крайней мере три различных понятия: «шкальный» диапазон интенсивностей, укладывающихся на шкале регистратора (например, стрелочного показывающего прибора); «разовый» ДД — диапазон интенсивностей, которые могут быть измерены без сложной перестановки элементов аппаратуры (например, внешних аттенюаторов, антенн и т. п.), и наконец, общий ДД — диапазон интенсивностей, которые вообще могут быть измерены данным измерителем. Общий динамический диапазон определяет пригодность аппаратуры для заданных целей. Например, для контрольных целей вполне достаточно обеспечить диапазон 20...25 дБ (5...2000 мкВт/см²).

Контрольные приборы (назовем их приборами группы К) удобно выпускать однотипными сериями, предназначенными для включения в состав каждой РТС или узла. Задача другой группы (инспекторские и исследовательские приборы — группа И) — обследование облучаемости больших территорий в зоне работы станций. Динамический диапазон этих приборов составляет по крайней мере 40...60 дБ: от 0,5...1 мкВт/см² до 0,1... ...1 Вт/см². Таким образом, интервал интенсивностей приборов этих типов должен быть намного выше, чем контрольных приборов. С учетом неравномерности амплитудно-частотных характеристик ВЧ тракта измерителей приведенную величину динамического диапазона приходится увеличивать на 5...10 дБ.

Шкальный и разовый ДД определяют удобство работы с аппаратурой, от них зависит и скорость проведения измерений. В идеальном случае все три диапазона должны совпадать, но часто это невыполнимо. Поэтому при обеспечении общего ДД свыше 20...30 дБ даже в последних моделях измерительной аппаратуры приходится пользоваться дополнительными плавно-переменными аттенюаторами, обеспечивающими разовый диапазон 40 ... ... 50 дБ, а свыше 50 ... 60 дБ — дополнительными постоянными аттенюаторами по 20 ... 30 дБ.

Следует упомянуть еще один параметр—устойчивость к перегрузкам, который проще всего нормировать в де-

цибелах к мощности в рабочей точке на характеристике чувствительного элемента прибора — детектора.

4. Высшая точность измерения интенсивности в свободном СВЧ поле, полученная в настоящее время (единицы процентов), достигается за счет высокой сложности и стоимости аппаратуры, требованием создания особых условий (исключением влияния побочных факторов и т. п.) и очень малой производительностью. С другой стороны, помещение в поле любого биологического тела с обычной пространственной структурной анизотропией настолько искажает это поле, что выдержать достигаемую в свободном поле точность, тем более при различных ракурсах освещения, оказывается фактически невозможным и не имеющим смысла. Поэтому приведенную выше (§ 4.1) точность измерений интенсивности ±3 дБ (для некоторых случаев даже ±4 дБ) при всех видах измерительных работ, связанных с защитой человека, можно считать вполне достаточной.

В зоне действия одной или нескольких РТС интенсивность поля в различных точках обследуемого участка изменяется по столь сложному закону, что ее можно рассматривать как случайную функцию координат обследуемого объекта. Поэтому одиночное измерение, произведенное в той или иной точке участка, мало о чем говорит. Для характеристики интенсивности поля в окрестностях обследуемой точки должны быть проведены измерения в возможно большем количестве точек и в качестве действующего значения интенсивности на данном участке должно быть принято среднее значение. Необходимая массовость измерений может быть получена только с помощью высокоскоростной или автоматизированной аппаратуры.

Наконец, большое значение для правильной оценки облучаемости имеет выбор методики, вернее методологии, обработки результатов. Например, ранее мы говорили о полной необоснованности оценки облучаемости территории несинхронно вращающимися антеннами по сумме максимумов ППМ от всех станций. В этом отношении одним из перспективных методов обработки результатов измерений можно считать оценку на основании известных ложных принципов, тем более с использованием массовых измерений автоматизированными приборами — дозиметрами и измерителями мощности дозы.

5. Быстродействие* полностью определяет возможность проведения массовых измерений (имея в виду, что время измерения как правило ограничено), оно находится в прямой зависимости от функционального и конструктивного решения. Применение прямопоказывающей системы регистрации (индикации), неполяризованный прием в широком телесном угле позволяет до минимума сократить время измерения. Степень эксплуатационных удобств, необходимость тщательной пространственной и поляризационной ориентации антенны также в значительной степени влияют на быстродействие аппаратуры.

Приборы, использующие тепловые принципы детектирования, регистрацию с помощью инерционных стрелочных микроамперметров и косвенный отсчет, являются наименее быстродействующими измерителями. Быстродействие современных интенсиметров составляет 50... ...100 измерений в час.

6. Инерционность является «внутренним» параметром интенсиметрической аппаратуры, но тем не менее она является одним из основных параметров, определяющих быстродействие аппаратуры при измерении полей станций с перемещающимися диаграммами. Инерционность—это минимальное время действия сигнала, которое обеспечивает регистрацию результата с заданной точностью; инерционность современных лучших болометров и термопар оценивается величиной $10^{-4}...10^{-3}$ с, и поэтому инерционность аппаратуры, использующей эти элементы, в принципе не может быть меньше этой величины.

Применение диодного детектирования совместно с запоминанием и индикацией на электролюминесцентных приборах позволяет обеспечить инерционность аппаратуры порядка $10^{-6}...10^{-5}$ с. Это дает возможность производить измерения «на проходе», без остановки перемещения диаграммы излучателя, часто не меняя обычного режима работы станции.

---

* Здесь это понятие применяется для оценки скорости проведения всего цикла измерений, включающего обычно следующие фазы: пространственный и поляризационный поиск (поляризационный поиск — поиск такого положения приемной антенны, когда устанавливается заданное направление поляризации), проверка нуля, подготовка к отсчету и отсчет показаний. Быстродействие определяется количеством измерений в единицу времени, например в час. При этом время на смену точек измерения, на изменение режимов излучения и другие процессы обычно не учитывается.

7. Минимальное расстояние зонда от металлических предметов, ограничивающее возможность использования данного типа измерителей для измерения полей внутри помещений с аппаратурой, — важная характеристика прибора. Основным элементом схемы, определяющим способность работы вблизи радиоотражающих предметов, является приемная антенна-зонд. Введение зонда в исследуемое поле вызывает эффекты по меньшей мере трех видов:

— искажение первичного поля; при этом заранее предугадать такую структуру зонда, чтобы исключить или сильно уменьшить эти искажения, оказывается задачей достаточно трудной, если вообще возможной;

— пространственное усреднение поля по приемной поверхности. Этот эффект проявляется в полях с явно выраженной пространственной неоднородностью (внутри помещений с радиоаппаратурой и т. п.). Неучет этого эффекта приводит к значительной отрицательной погрешности в измерениях уровня поля, хотя на точности измерения дозы почти не сказывается;

— появление погрешности оценки биологической эффективности поля на основании данных измерений из-за несоответствия электромагнитной структуры поля и того поля, для которого она рассчитана. Под этим углом зрения «черное» тело в виде абсорбирующих шариков (на который возлагали большие надежды при разработке зондов с высокой пространственной и поляризационной изотропностью [151]) больше не кажется идеальным зондом для электромагнитного поля с явно выраженной электромагнитной неоднородностью, так как нагрев абсорбирующих шариков зависит от ряда причин и в общем случае не пропорционален ни одному из измеряемых параметров поля: Π, E или H.

Вообще говоря, можно предположить, что создание зонда, исключающего все три эффекта, в будущем едва ли возможно; разработка малогабаритных зондов с эффективной поглощающей подложкой позволила в некоторой степени снизить влияние перечисленных эффектов, во всяком случае по сравнению с обычными полуволновыми антеннами, применяемыми в интенсиметрической аппаратуре первых типов; но до идеального решения, очевидно, еще далеко. Поэтому и сейчас продолжаются поиски датчиков для безантенных вариантов измерителей, которые, возможно, со временем заменят сегодняш-

ние приборы, построенные по традиционным схемам: антенна — детектор — (усилитель) — регистратор.

6.1.2. Краткий исторический обзор разработки измерительных приборов и средств обнаружения излучений. Вкратце все этапы пути, пройденного конструкторами интенсиметров за последние полтора десятка лет, можно охарактеризовать так: обнаружение излучения с помощью простейших индикаторов — слуховых сигнализаторов или неоновых лампочек; использование известных методов и приборов (измеритель мощности, антенна) для измерения уровней полей; разработка на основе известных методов специальной измерительной аппаратуры и, наконец, применение новых методов построения измерительной аппаратуры. Хронологически это выглядит приблизительно так.

1953 г. — первое сообщение об использовании для индикации неоновой лампочки, помещенной под козырьком головного убора оператора [179]. Применение неоновой лампочки для индикации было описано и позже [89, 138]. В 1958 г. был выпущен слуховой индикатор поля [166].

1956—1959 гг. — успешное использование стандартных приборов: измерителей мощности и антенн с известной эффективной поверхностью для целей измерения полей СВЧ [8].

1957—1960 гг. — первые сообщения о разработке специальных приборов — интенсиметров [80, 174, 193]. Все эти приборы были основаны на использовании известных методов детектирования принятого антенной СВЧ сигнала с помощью термисторов, включенных в цепь сбалансированного моста. Сообщения об использовании термисторных детекторов в зарубежных разработках интенсиметров поступают и сейчас. На этом же принципе построен и отечественный измеритель плотности мощности типа ПО-1.

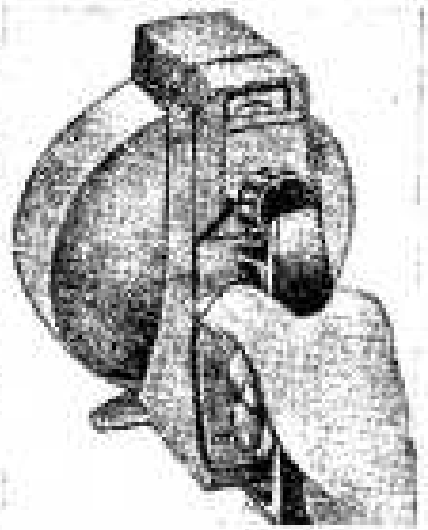


Рис. 6.1.1. Измеритель плотности мощности типа В86В1.

1960 г. и далее — разработка новых принципов конструирования измерительной аппаратуры [65, 75а, 91, 93, 104 и др.].

Фото внешнего вида нескольких характерных моделей интенсиметров показаны на рис. 6.1.1—6.1.3; параметры некоторых зарубежных и отечественных интенсиметров приведены в табл. 6.1.1, содержащей также данные о требуемых на сегодня значениях этих параметров. Из таблицы видно, что ни один из этих приборов не удовлетворяет современным требованиям [104].

Одним из универсальных приборов, предназначенных специально для радиогигиены СВЧ, является измеритель ППМ СВЧ типа ПО-1 (рис. 6.1.3). Он предназначен для измерения СВЧ излучений практически во всем используемом спектре СВЧ: от сантиметрового до метрового диапазона. Детектором в нем служит термистор, обеспечивающий усреднение импульсов от 20 мс и меньше (период следования импульсов выше 50 Гц), если пиковая мощность не выходит за пределы 50 Вт (паспортные данные). Прибор предназначен

для измерения полей в свободном пространстве и закрытых объемах. Весь динамический диапазон (30 ... 49 дБ) перекрывается использованием аттенюаторов и сменных антенн с разной эффективной поверхностью. Несмотря на большую массу измерителя мощности (около 10 кг), прибор удобен в работе, хотя требует большого времени для пространственной и поляризационной наводки антенны излучателя и отсчета показаний. Основные особенности работы с прибором ПО-1 будут даны ниже (п. 6.2.2). Здесь мы коснемся лишь принципов его работы.

Рис. 6.1.2. Измеритель плотности мощности 3-сы диапазонов.

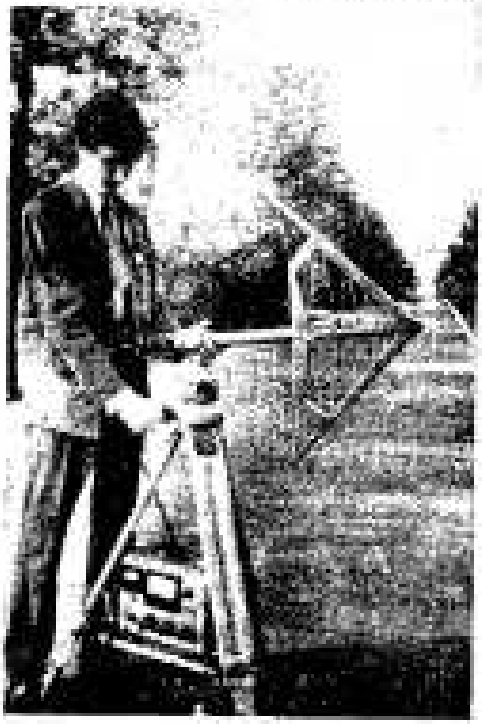


Рис. 6.1.3. Отечественный измеритель плотности мощности ПО-1.

Прибор ПО-1 является основным измерительным прибором, применяемым в настоящее время в СССР для радиогигиены [23]*. По принципу действия он представляет собой комбинацию термисторного измерителя мощности и измерительной антенны (антенны, у которой эффективная площадь известна с гарантированной точностью). Измерение ППМ состоит в том, что измеряется мощность СВЧ на выходе антенны, а ППМ вычисляется как отношение мощности к эффективной площади антенны. Прибор ПО-1 перекрывает большой диапазон частот (см. табл. 6.1.1), поэтому он комплектуется пятью термисторными головками и одиннадцатью антеннами, а также комплектом аттенюаторов для расширения динамического диапазона. В том случае, если прибор предназначается для работы в более узком диапазоне частот, количество термисторных головок, антенн и аттенюаторов соответственно уменьшается. В диапазоне частот от 150 до 1 800 МГц используются две логопериодические антенны, в остальной части диапазона — рупорные антенны. Антенны и термисторные головки устанавливаются на поворотном устройстве на треноге, что позволяет наводить антенну на источник излучения.

Как следует из таблицы, точность прибора ПО-1 достаточно

---

* В самое последнее время нашей промышленностью выпущена модификация ПО-1 — прибор П3-9, более легкий и широкополосный измеритель поля. В нем, в частности, применимы широкополосные антенны (разработка Л. Н. Лука), мост с использованием всего лишь одного стрелочного прибора и ряд других новшеств.

Таблица 6.1.2

Параметры интенсиметрической аппаратуры

Параметр	Требуемое значение	США		Англия	СССР	
		8608I	NP-157	—	ПО-1	
					тип А	тип Г
Рабочий диапазон частот, ГГц	Непрерывно 0,2...3,2; дискретно до 10...17	0,4...10	0,2...10	≈1	0,15...2,7	0,15...16,7
Чувствительность, эВт/см²	10^{-6}	10	0,1	10^{-1}—10^{-3}	$(0,83...0,67)\times10^{-3}$	$(0,02...1)\times10^{-3}$
Динамический диапазон, дБ	группа К: 25; группа Н: 70	6...8	40	≈30	40	30—40
общий						
разовый	25 / 50		—	—	20	
шкальный	5...25		—	—	8,7	
Устойчивость к перегрузкам	10		—	—	8	
Точность измерений, ±дБ	3...4	2	—	—	1 (в свободном пространстве)	
Быстродействие, измерений в час	50...100	50...100*	5...10*	5...10*	5...10	
Инерционность, с	10^{-6}...10^{-3} (для измерителя мощности дозы 1...10)	0,5...2	0,5...2	0,5...2	1	
Время хранения результатов, с	1 и более	нет	нет	нет	нет	
Минимальное расстояние до точечного излучателя, см	10	≈75*	≈75*	≈3*	(1...2) λ	
Количество антенн	Не более 2...3	1	3	1	3	11
Масса комплекта, кг	2...5	0,9	4,0...5,8	2	63	92

* Предположительно.

высока и обеспечивает все виды работ в области радиогигиены, однако инерционность измерителя, громоздкость и большая масса всего комплекта весьма затрудняют его использование в полевых условиях при измерениях полей современных средств.

Успехи, достигнутые в технике интенсиметрии СВЧ за последние 15 лет, позволяют считать, что сейчас практически в любой ситуации можно оценить опасность воздействия СВЧ поля и принять необходимые меры для ее устранения.

Между тем, рост требований практики выявляет ошибки, допущенные при конструировании интенсиметров-первенцев, заставляет искать новые технические решения. Например, прибору ПО-1 присущи некоторые недостатки: большая инерционность (из-за использования термисторных детекторов и, главное, электромеханических показывающих приборов), невозможность проводить измерения вблизи металлических предметов из-за использования полуволновых антенн, трудность баланса моста, значительная масса; прямой отсчет, предусмотренный в приборе, по ряду причин фактически не применяется.

6.1.3. Принципы детектирования СВЧ энергии. Параллельно с совершенствованием техники интенсиметрии продолжался поиск новых путей приема и регистрации СВЧ поля. Один из них заключается в исследовании эффектов взаимодействия электромагнитного поля с веществом, которые могут быть использованы в датчиках безантенных радиометров.

Такие датчики предлагалось строить в виде объемов с инертным газом (неон и др.), пленочных болометров и термопар и т. п. Некоторые характерные данные исследования датчиков электромагнитных волн приведены в табл. 6.1.2. Полученные результаты показали, что выявленные эффекты либо мало изучены (как, например, взаимодействие с жидкими монокристаллами, изменение светополяризационных свойств веществ), либо выражены слабо (взаимодействие с ферритами), либо условия их проявления реализовать в малогабаритных приборах технически трудно (например, эффект Холла и др.). Не оправдались надежды на создание на основе таких эффектов датчиков, обладающих высокой пространственной, поляризационной и частотной изотропностью. Как правило, датчики включаются в цепь системой проводов, создающих общую высокую анизотропию и искажающих конечный результат.

В одном из типичных экспериментов для измерения температуры нагрева *«черного шара»* — шарика, наполненного соответствующим радиопоглощающим веществом, использованы шесть отводов, которые, как считают сами авторы [151], радикально меняют условия абсорбции поля. Исключение здесь могут составить, пожалуй, датчики с бесконтактным съемом данных, например, основанные на эффектах изменения поляризационных свойств кристаллов. Но такие эффекты находятся еще в стадии начального изучения. Частотная зависимость датчиков с использованием «черного шара» появляется, не только из-за влияния проводов, высокой радиоконтрастности и конечных размеров датчиков на частотах, близких или кратных к частоте несущей, но также из-за влияния конечной длины проводов.

Особые надежды возлагаются на тепловые эффекты, возникающие в *тонких пленках* под воздействием поглощенной СВЧ мощности [7]. Многие из результатов исследований в этой области сейчас

успешно используются в волноводной технике для измерения больших мощностей. Между тем, минимум две особенности ограничивают возможность широкого использования болометрических пленок и пленочных термопар в радиометрии СВЧ полей: необходимость высокой теплорадиационной защиты от внешних тепловых воздействий и относительно высокая постоянная времени пленок, которая находится в пределах долей миллисекунды и более. Кроме того, как уже говорилось, изотропные свойства исследованных датчиков недостаточны (даже в пределах полусферы).

Таким образом, пока единственным видимым путем реализации современных требований к интенсиметрической аппаратуре остается конструирование антенных систем с разделением функций приема, детектирования, усиления и регистрации сигналов.

Примером такого интенсиметра, как мы видели, является измеритель поля ПО-1 и другие приборы (см. табл. 6.1.1), применяемые в интенсиметрии полей биологически опасных уровней. Основные недостатки этих приборов, обусловленные инерционностью и малой чувствительностью использованных детекторов (термисторов и болометров) мы рассмотрели выше. Следует отметить, что аппаратура, как правило, сконструирована весьма тщательно, с максимальным использованием всех технических возможностей своего времени (например, коэффициент стоячей волны в тракте высокой частоты интенсиметра ПО-1 допускается не выше 1,5 ... 2), поэтому отмеченные недостатки можно считать следствием примененного принципа измерения.

Единственным чувствительным элементом, пригодным для использования в малоинерционной радиометрической аппаратуре, оказались полупроводниковые детекторы, осуществляющие непосредственное преобразование СВЧ энергии в постоянный ток, однако и они непригодны там, где принципиально необходимо усреднение сигналов в большом динамическом диапазоне; в этом случае целесообразно применять термопары, лучше всего с раздельным нагреванием и съемом (о таких приборах вкратце будет сказано ниже, в п. 6.1.6).

Идея использования полупроводниковых приборов в интенсиметрии ВЧ и СВЧ разрабатывается очень давно [172, 174]. Полупроводниковые диоды обладают высокой чувствительностью и малой инерционностью, в нашем случае, как правило, даже полностью не реализуемыми. Коэффициент передачи современных диодных детекторов составляет (по мощности) 10^{-4} ... 10^{-2}, частотный диапазон диодов часто определяется только

Таблица 6.1.2

Некоторые результаты исследования датчиков поля

Используемый эффект	Основной измеряемый параметр поля	Пример конкретного выполнения	Условия испытаний	Полученные результаты				Авторы (источник)
				$P_{мин}$	$P_{макс}$	инерционность	выход	
Взаимодействие с полупроводником (эффект Холла)	Π	n-германий с удельным сопротивлением 14 Ом·см; 5×10×0,5 мм³	П-образный резонатор, f=4 ГГц	0,01 Вт	2 Вт	—	1 мВ/Вт	[72]
Тепловое взаимодействие с однородными металлическими пленками	Π	Полоска платины с поверхностным сопротивлением 70...400 Ом	λ=3 см	—	0,4 Вт/см²	—	0,5 Ом/мВт	[7, 143]
То же	Π	—	λ=1...10 см	—	—	—	—	[49]
Тепловое взаимодействие с термопарой:								
пленочной	Π	—	—	10 мкВт	200 мВт	—	0,1 мВ/мВт	[17, 143]
точечной	Π	ТВБ-3,4 и др.	f=0...16 ГГц	10 мкВт	5...7 мВт	4 с	3...10 мВ/мВт	—
Нагрев слоя желатины	Π	Слой желатины с термодатчиками	СВЧ	—	—	6 мин	—	[150]
Нагрев „черного шара"	Π	Диаметр шарика 3 мм с плетью термопарами	f=1 ГГц	—	—	54 с	250 $\frac{мкВ \cdot см^2}{мВт}$	[151]
Воздействие на нелинейные сегнетоэлектрики	E	Сегнетокерамика ВК-1 в волноводе	f=37 МГц	0,4 мВт	10 мВт	10 с⁻¹	2,5 кГц/мВт	[161]
То же	E	Варикапы ВК-10, ВК-1-1, ВК-1-2, ВК-1Б и др., емкость до 0,2 мкФ, толщина менее 300 мкм, диаметр 9 мм; $f_{измерительное}$ = 1 кГц	Используется постоянное смещение	0,1 $\frac{В}{мм}$	5 $\frac{В}{мм}$	—	Удвоение емкости при изменении напряжения от 30 до 3 В	[1]
Изменение электрического сопротивления ферритов	H	—	—	—	—	—	—	[10]

Продолжение табл. 6.1.2

Используемый эффект	Основной параметр поля	Пример конкретного выполнения	Условия испытаний	Полученные результаты				Авторы (источник)
				$P_{мин}$	$P_{макс}$	инерционность	выход	
Воздействие магнитного поля на жидкие кристаллы	H	Твердые растворы кристаллов HgSe...HgTe	—	0,08 А/м	—	10^{-6}...10^{-10}с	—	[19]
Взаимодействие с оптически прозрачными средами	H	—	—	—	—	—	—	[131]
Изменение плоскости поляризации световых волн	E	Кристалл $NH_4H_2PO_4$	—	100 $\frac{В}{см}$	—	—	—	[157]
Пироэлектрический эффект	Π	—	—	—	—	—	—	[18]
Пироэлектрическое взаимодействие с монокристаллами	Π	Монокристалл $(NH_2CH_2COOH)_3 \cdot H_2SO_4$	f=9,4 ГГц	40 Вт	4000 Вт	10^{-6}с	—	[200]
Взаимодействие с холодной плазмой	$E_{плз}$	—	—	—	—	—	—	[114]
То же	$E_{плз}$	Сфера с гелием	f<30 МГц	15...80 $\frac{В}{см}$	—	—	—	[80]
			f=900 МГц	9,5 $\frac{В}{см}$	—	—	—	
То же	$E_{плз}$	Неоновая лампа Ne-51, фотолампа	СВЧ	5 $\frac{мВт}{см^2}$	—	—	—	[38]
			То же	1...2 $\frac{мВт}{см^2}$	—	—	—	[38]

конструкцией патрона-держателя и в необходимых случаях может составить несколько октав.

Большим недостатком полупроводниковых диодов, ограничивающим применение их в измерительной технике, является температурная и временная нестабильность. В интенсиметрической аппаратуре, рассматриваемой ниже, их удалось применить только после того, как были найдены способы нейтрализации указанных недостатков.

Применение диодного детектирования позволяет выполнить как самопоказывающие измерители, если требуемый динамический диапазон уровней относительно невелик, так и измерители с наводкой [93], т. е. с отсчетом уровня по шкале ручного регулятора.

6.1.4. Варианты функциональных схем интенсиметров. В настоящее время разработаны схемы радиоинтенсиметров с применением преобразователя СВЧ на полупроводниковых диодах и термопарах. В обоих случаях чаще применяются схемы с наводкой, хотя в одном из последних вариантов измерителя ЛОЛЯ удалось выполнить прибор с прямым дискретным отсчетом (самопоказывающий) в диапазоне интенсивностей порядка 20 дБ (см. п. 6.1.6).

В измерителях с наводкой процесс измерения включает в себя три фазы: наводку, отсчет по шкале уровней и отсчет отклонений от калиброванного уровня для внесения поправки к основному отсчету. Наводка (и отсчет) может осуществляться как до, так и после детектирования. В первом случае общий ДД прибора, который определяется пределами работы СВЧ аттенюатора и экранировкой схемы, достаточно широк (обычно превышает 50...60 дБ). Детектор же работает в пределах небольшого участка амплитудной характеристики. При наводке после детектирования (по низкочастотному аттенюатору) динамический диапазон определяется, с одной стороны, шумами усилителя, с другой — верхним амплитудным пределом работы диода. Реализуемый практически диапазон уровней не превышает 20... ...25 дБ, однако стоимость прибора оказывается значительно ниже, уменьшаются его вес и габариты.

В приборах обоих типов (самопоказывающего и с наводкой) при неавтоматизированном съеме данных отсчет абсолютного или относительного уровня производится отсчетом показаний индикатора, находящихся

в определенной зависимости от входного сигнала. Эта зависимость и определяет характер регистрации сигнала (по среднему или пиковому уровню, пропорционально интегралу входного сигнала и т. п.).

Наиболее простой способ усиления сигнала после детектирования — с помощью инерционных **усилителей постоянного тока** (УПТ) — здесь, очевидно, непригоден. Действительно, при уровне пиковой мощности на входе детектора порядка 10^{-4} Вт, допуская к. п. д. детектора порядка 10^{-3}, скважность сигнала 10^3, постоянное напряжение на выходе детектора, нагруженного на сопротивление 10^3 Ом, составляет около 10^{-3} В. С помощью таких устройств нельзя измерить амплитуду отдельных импульсов при приеме импульсных сигналов высокой скважности; появляется перегрузка диодов. Для сужения динамического диапазона работы диода-детектора сейчас используется регистрация сигнала по пиковому уровню и усиление сигнала **широкополосными видеоусилителями.** Как будет показано ниже, это позволяет упростить защиту кристалла от выгорания, повышает надежность работы детектора в условиях воздействия полей с высокой скважностью, упрощает калибровку индикатора и детектора.

Для измерения сигналов СВЧ с разнообразными видами модуляции (от импульсно-модулированных с высокой скважностью до немодулированных) на входе усилителя включается сверхвысокочастотный переключатель-манипулятор для импульсной модуляции сигнала с глубиной, близкой к единице, и регистратор пикового уровня [93].

Можно сравнить этот способ обработки сигнала с обычным, когда сигнал после манипулирования со скважностью $q_м \approx 2$ и после усиления регистрируется по среднему уровню. Применение регистрации по среднему уровню при поддержании на входе постоянной средней ППМ приводит к вариациям пиковой мощности на входе детектора в Δq раз (Δq — изменение скважности импульсов входного сигнала). Это также приводит к перегрузкам диода и в некоторых случаях (при воздействии импульсов с высокой скважностью) к выходу его из строя. Кроме того, вследствие появления «мертвых зон» вблизи частоты манипуляции (или кратной ей) приходится предусматривать дополнительный орган регулировки частоты манипуляции.

Пиковая регистрация совместно с предварительной манипуляцией сигнала со скважностью, близкой к единице (большую часть времени канал усиления остается открытым), позволяет до минимума снизить требование к стабильности параметров манипуляции, по крайней мере в $[2(1-q_м^{-1})]^{-1}$ раз* снижает вероятность появления мертвых зон и повышает устойчивость работы диода-детектора. Применение пиковой регистрации автоматически решает задачу снижения инерционности прибора до необходимого уровня $10^{-6}...10^{-5}$ с. Относительно высокий коэффициент передачи диода-детектора позволяет выполнить измерительные приемники для диапазона уровней 10^{-6} Вт/см^2 и выше по схеме прямого усиления. Задача создания высокочувствительных измерителей поля облегчается возможностью применения в них видеоусилителей.

---

* Уменьшение вероятности появления мертвых зон $p_м$ в $^1/_2(1-1/q_м)^{-1}$ раз (по сравнению со случаем манипуляции сигнала на входе при $q_м=2$) произойдет уже только из-за уменьшения времени, когда вход усилителя оказывается закрытым. Между тем, вероятность $p_м$ фактически оказывается еще меньше (в $K_{ум}$ раз), если учесть, что при попадании какого-либо входного импульса в момент, когда вход усилителя оказался закрытым, даже при незначительной разности частот повторения импульсного сигнала $F_с$ и манипуляции $F_м$ через некоторое время t импульсы сигнала выйдут «из-под прикрытия», и пиковый детектор зафиксирует максимальную амплитуду измеряемых импульсов. Если эта возможность будет хотя бы раз за время $t_п$ (время памяти пикового детектора), то режим работы индикатора не будет нарушаться. Для $K_{ум}$ можно записать:

$$K_{ум}=\frac{t_п}{t_с}+1=\frac{t_п F_м\,|\,1/F_с-1/F_м\,|}{(1/F_м-\tau_м)}+1=\frac{t_п F_м\,|\,F_м/F_с-1\,|}{(1-1/q_м)}+1,$$

где $q_м=1/\tau_м F_м$; $\tau_м$ — время, соответствующее открытому входу усилителя за период манипуляции $1/F_м$.

Таким образом, за счет памяти пикового детектора вероятность $p_м$ снижается до величины

$$p_м=\frac{(1-1/q_м)}{K_{ум}}=\frac{(1-1/q_м)^2}{t_п F_м\,|\,F_м/F_с-1\,|+(1-1/q_м)}$$

В качестве примера рассчитаем $p_м$ для двух случаев, когда при $q_м=1{,}1$, $t_п=1$ с: 1) $F_с=F_м=1$ кГц и 2) $F_с=1$ кГц, $F_м=1{,}05$ кГц. В первом случае при равенстве частот $F_с$ и $F_м$ вероятность оказывается равной приблизительно 0,1, во втором при $F_с-F_м=50$ Гц — всего $2\cdot10^{-4}$.

В обычных схемах измерителей поля детекторного типа, если они не предназначены для измерения только импульсных излучений, применяются усилители постоянного тока (УПТ). Применяются они и в интенсиметрах с использованием инерционных детекторов* (например, на термопарах). Эти усилители обычно капризны в работе и зависят от температуры. Для измерения импульсно-модулированных излучений и при использовании интенсиметров с предварительной манипуляцией сигнала могут быть использованы относительно простые высокочувствительные схемы усилителей видеоимпульсов, позволяющие реализовать необходимые требования к интенсиметрической аппаратуре. При одинаковых геометрических размерах коэффициент усиления видеоусилителей, как правило, на 20 . . . 30 дБ выше коэффициента усиления УПТ и составляет 50 . . . 70 дБ.

В самопоказывающих интенсиметрах с наводкой по цепи постоянного тока чувствительность устанавливают в процессе производства, или это делает оператор перед работой с определенными излучателями (по расчетным данным или в поле путем сравнения с более точными приборами). Устройства предустановки чувствительности обычно выполняются в виде полупеременных СВЧ аттенюаторов с небольшими пределами затухания, их регулировка выводится «под шлиц». В приборах с наводкой по цепи СВЧ имеется, как правило, орган подстройки чувствительности по собственному генератору стабильного уровня.

Применение высокочувствительных схем усиления в регистрации (по сравнению с обычными мостами постоянного тока и тепловыми датчиками) позволяет по-новому рассмотреть вопрос о необходимых и достаточных параметрах антенны-зонда. До сих пор к наиболее важным параметрам антенн относили величину эффективной поверхности, которая из-за ограниченной чувствительности должна быть достаточно высокой и стабильной в заданном диапазоне частот. Сейчас требования к зонду в значительной степени меняются. Вот наиболее важные из параметров, которые приходится нормировать при конструировании зонда для работы в составе детекторных интенсиметров: стабильность направления максимума и гладкость диаграммы по диапазону, удобство механического, электрического и эстетического сопряжения с блоком усилителя. Требуемая широкополосность антенн-зондов составляет 3 . . . 4 октавы, геометрические размеры антенны не должны превышать нескольких сантиметров, отклонение оси диаграммы от нормали к плоскости апертуры не должны превышать 10 . . . 20° во всем диапазоне частот.

* Такие интенсиметры необходимы при нормировании ППМ, усредненной за определенное время (порядка секунд или минут).

Особо следует упомянуть здесь необходимость ограничивать геометрические размеры зонда. Геометрически большие антенны интегрируют уровень поля по всей приемной поверхности. В условиях очень высокой неравномерности внутренних полей это приводит к значительному занижению результатов, иногда в десятки раз. Для повышения точности измерений внутренних полей в измерителях поля применяют геометрически малые зонды. При этом не ставится специально цель учесть реактивный характер поля: ведь реактивность поля проявляется начиная с расстояний порядка $\lambda/2\pi$, т. е. на расстояниях очень малых во всем диапазоне СВЧ. По этой же причине, несмотря на то, что малые зонды имеют, как правило, индуктивный (реже емкостной) характер, можно считать, что с их помощью измеряется именно величина ППМ. Рекомендации по учету реактивного характера поля на очень малых расстояниях от щелей приведены ниже, в п. 6.2.6.

6.1.5. Основные элементы схем интенсиметров. Перейдем к рассмотрению основных элементов схем интенсиметров. В связи с тем, что элементы серийной аппаратуры рассмотрены достаточно подробно в литературе, наибольшее внимание нам придется здесь уделить принципам работы и конструированию элементов новой интенсиметрической аппаратуры, многие из которых описаны в литературе недостаточно полно или вообще имеются только в виде патентных материалов.

В соответствии с принципом работы детекторных интенсиметров, рассмотренных выше, в интенсиметр должны входить следующие каскадно соединенные элементы: антенна — как правило, малогабаритная, малочувствительная, но достаточно широкополосная и удобная в конструктивном отношении; аттенюатор СВЧ — обычно плавнопеременный, обладающий заданными пределами регулировки; прерыватель (манипулятор) — экономичный и достаточно широкополосный; детектор — элемент со стабильными характеристиками, пригодный для детектирования относительно высоких уровней мощности; усилитель, обеспечивающий высокий коэффициент усиления при малом дрейфе, и регистратор, позволяющий производить отсчет результатов измерений или фиксировать заданный уровень сигнала для отсчета по шкале аттенюатора.

Антенна. Как правило, для измерения применяются либо антенны с размерами, близкими или большими длины волны («большие» антенны), либо антенны-зонды с размерами, не превышающими десятых долей длины волны. Измерительные антенны первой группы достаточно разработаны и широко применяются в самых различных областях измерительной техники. К ним от-

носятся различные рупорные, вибраторные полу- и четвертьволновые антенны и т. д. Сюда же входят и так называемые логопериодические антенны — большой класс широкополосных антенн, появившихся в 50-х годах [5, 127, 178]. В них на каждой рабочей частоте из всего набора диполей различной длины, включенных параллельно, «работает» один или небольшая группа диполей с длиной около половины длины волны. Передние вибраторы (более короткие) играют роль директоров, задние (более длинные)—роль рефлекторов [14]. Общий вид одной из таких антенн (П6-22) см. на рис. 12.4,*а*. Аналогично работают и круглополяризованные антенны.

На основе квазипериодических структур, используемых в логопериодических антеннах (в простейшем случае — набор линейных вибраторов различной длины), могут быть разработаны малогабаритные антенны-зонды, пригодные для применения в детекторной интенсиметрической аппаратуре (об этих антеннах более подробно будет сказано ниже).

«Большие» антенны имеют достаточно большую эффективную поверхность и поэтому применяются с термисторными измерителями мощности относительно невысокой чувствительности (например, в ПО-1). Однако в некоторых случаях их применение ограничено. Действительно, исходя из формулы для дальней зоны антенн (4.3.3) и электрического размера антенны (0,5 . . . 1) λ, минимальное расстояние между антенной и исследуемым излучателем не должно быть меньше (1 . . . 2) λ. На меньших расстояниях погрешность измерения быстро растет. Зависимость ошибки от расстояния до радиоотражающей плоскости носит квазипериодический характер с выбросами в положительную и отрицательную области; на малых расстояниях ошибки всегда отрицательные и достигают 50% и более. Это является существенным ограничением в применении больших антенн на относительно низких частотах (можно считать, от 500 . . . . . 1000 МГц и ниже). Вторым ограничением применения таких антенн в интенсиметрической аппаратуре является их относительная узкополосность. Исключение составляют логопериодические антенны [112, 127, 177]. Наконец, важным ограничением применения в интенсиметрах СВЧ больших антенн является значительная масса и габариты, затрудняющие работу с аппаратурой.

Максимальный размер логопериодических антенн, вы-

полненных в виде двойных плоских спиралей, определяется соотношением между диаметром антенны $2\rho_{макс}$ и наибольшей длиной волны, для которой коэффициент бегущей волны и эллиптичность поляризации (мера отклонения от круговой поляризации) находятся в допустимых пределах, обычно не более 1,5 ... 2 раз:

$$\lambda_{макс} \approx 2\pi\rho_{макс}. \qquad (6.1.1)$$

Диапазон частот, в котором работают логопериодические антенны, определяется только максимальным диаметром антенн и устройством ввода и практически не зависят от способа заполнения (в некоторых источниках [5, 171] отмечается, что антенны с более плотной намоткой имеют более однородные диаграммы и меньший коэффициент эллиптичности на крайних частотах).

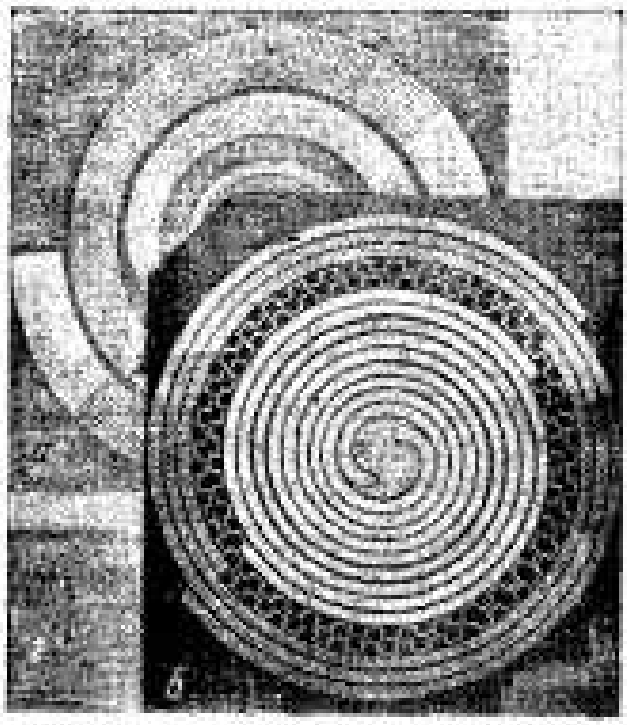


Рис. 6.1.4. Внешний вид печатных антенн с плавным замедлением фазовой скорости (*а*) и с выделенным участком для работы в узком диапазоне частот (*б*).

Это относится не только к плоским спиральным конструкциям антенн, но и к неплоским, например, конусным вариантам би- и полиспиральных систем, а также к логарифмически периодическим линейно-поляризованным антеннам, которые появились несколько позже спиральных [134, 177]. Антенны, подпадающие под понятие «логарифмические периодические», должны определяться более широким понятием «квазипериодические» антенны (КПА), так как соблюдение логарифмического закона в формированиях структуры (конструкции и расположения) их активных элементов благодаря самоустанавливающемуся режиму излучения необязательно.

Двухспиральные квазипериодические антенны не являются малогабаритными, так как при изменении частоты до $f_{мин} \leqslant c/2\pi\rho_{макс}$

резко изменяются параметры излучаемого поля из-за увеличения отражений от концов спиралей. Это приводит к увеличению реактивной составляющей входного импеданса, и эффективность антенны быстро снижается. Кроме того, несколько раньше начинает проявляться осевая асимметрия внешних витков спирали и появляется явно выраженная эллиптичность излучения (до трех и более).

Для уменьшения габаритов антенн с квазипериодической структурой используется известный принцип увеличения электрической длины вибраторов путем включения в их ветви укорачивающих элементов в виде сосредоточенных реактивностей или замедляющих структур. В обычных вибраторных антеннах применить укорочение более чем в 1,25 ... 1,4 раза обычно не удается из-за заметного ухудшения электрических характеристик антенны (снижения к. п. д. и др.), но применение замедляющих цепей в квазипериодических структурах с самоустанавливающимся режимом излучения оказалось весьма эффективным. Здесь имеет смысл хотя бы вкратце описать принципы работы и конструирования КПА, в активных цепях которых применяются замедляющие структуры. Обычно нас интересуют не только малые габариты, но и достаточно широкие пределы работы в высокочастотном участке диапазона, поэтому в КПА центральные витки конструируют без замедления, а внешние выполняются в виде спиралей или плоского зигзага с переменным монотонно убывающим по длине шагом. Внешний вид печатных антенн с замедлением приведен на рис. 6.1.4,а, б.

При исследовании антенн с замедлением применяется противофазное питание плечей, что соответствует основному режиму излучения. Обычно ширина диаграммы таких антенн находится в пределах 40 ... 70°, неперпендикулярность оси диаграммы к плоскости антенны зависит от частоты, но не превосходит 10 ... 20° (обычная величина для логопериодических антенн); коэффициент эллиптичности печатных антенн выше намотанных, эффективная площадь в большой степени зависит от коэффициента замедления и составляет единицы квадратных сантиметров. Эллиптически поляризованные антенны были использованы в одной из первых экспериментальных моделей измерителя поля *.

В конструкциях интенсиметров с достаточно чувствительной схемой усиления применяются электрически малые вибраторы, чаще всего магнитные. Это обусловлено простотой согласования таких зондов с фидером, отсутствием необходимости в симметрировании, а также малым влиянием тела оператора на его основные характе-

---

* Недавно удалось использовать двухспиральные квазипериодические структуры в акустических излучателях, работающих в звуковом диапазоне частот. Такой излучатель представляет собой уложенные в виде периодической структуры полые звукопроводы в виде многозаходной спирали с четным количеством ветвей. К центру структуры подключен дифференциальный звуковозбудитель. Для уменьшения габаритов периодическая структура снабжена элементами замедления, коэффициент замедления которых увеличивается к периферии структуры [100]. Подобный излучатель, дополненный устройством формирования продольной волны, работает как громкоговоритель с очень гладкой частотной характеристикой.

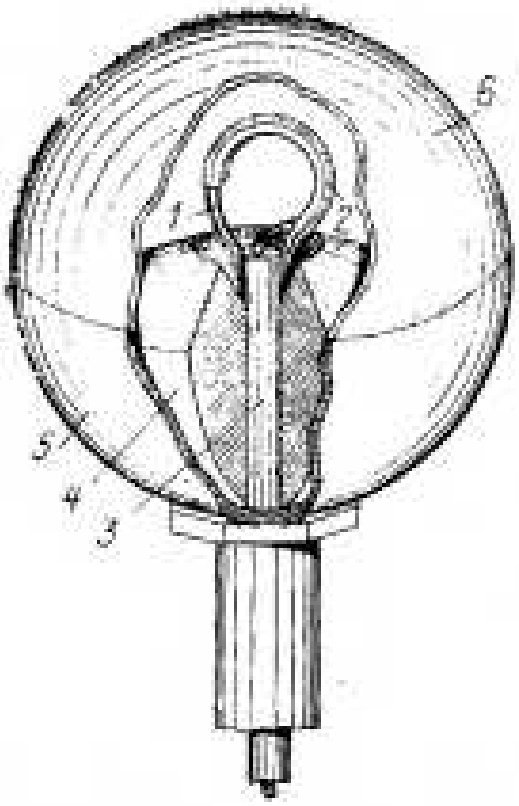


Рис. 6.1.5. Конструкция малогабаритной антенны-зонда.

ристики. Кроме того, такие зонды в какой-то мере учитывают индуктивный характер щелей и других неплотностей в экранах с аппаратурой и трактах.

Для измерения составляющих дальнего поля или поля, локализованного внутри замкнутых объемов (типа волноводов или резонаторов), датчики, выполненные в виде простейших электрических и магнитных диполей размерами много меньше длины волны [199], оказываются непригодными по крайней мере по двум причинам. Первое — это нестабильность диаграммы зонда: даже в свободном пространстве диаграмма обычного электрически малого зонда — из-за влияния питающих проводов и аппаратуры — в значительной степени отличается от идеальной вплоть, например, до появления нуля в области предполагаемого максимума. Вследствие малой эффективной поверхности самой антенны образовавшаяся «диаграмма» сильно зависит от частоты, положения оператора, близости радиоотражающих предметов и т. д. Второе — это искажения исследуемого поля из-за влияния элементов питания и конструкции измерителя.

В аппаратуре, предназначенной для исследования радиополей в свободном пространстве, электрически малые вибраторы применяются с дополнительными устройствами формирования диаграммы. Рассмотрим одну из таких конструкций, используемых нами в последних интенсиметрах [97] (рис. 1.2.4,*г*.)

Антенна-зонд (рис. 6.1.5) содержит вибратор в виде рамки *1* с компенсирующим устройством *2* (такие компенсаторы нашли распространение в технике волноводных измерений [152]). Рамка подключена к коаксиальной линии *3*. В задней нерабочей части полусферы рас-

положена подложка 4 из радиопоглощающего материала и металла 5. С рабочей стороны устройство закрыто крышкой 6 из радиопрозрачного материала.

Переменный аттенюатор. В зависимости от назначения и типа интенсиметров аттенюаторы могут выполнять: отсчет, предварительную установку (предустановку) чувствительности, подстройку чувствительности.

Отсчетные аттенюаторы обычно стремятся выполнять таким образом, чтобы их градуировка не зависела от частоты во всем рабочем диапазоне и имела бы вид линейной функции затухания в децибелах от положения указателя. Это упрощает применение различных пересчетных устройств для съема результатов измерений (например, в единицах ППМ) непосредственно со шкалы аттенюатора. Необходимый диапазон затуханий отсчетного СВЧ аттенюатора определяется отношением чувствительности и максимального измеряемого уровня ППМ, частотной неравномерностью антенны-зонда и т. д. Исходя из этого он обычно выбирается не меньше 50 . . . . . 60 дБ.

Если отсчет производится по аттенюатору, включенному в цепь низкой частоты (т. е. после детектора), то для предотвращения перегрузки детектора применяются аттенюаторы с максимальным затуханием не более 25 . . . 30 дБ, при этом требования к их частотным свойствам значительно ниже и выполняются они более простыми, легкими и малогабаритными.

В качестве отсчетных СВЧ аттенюаторов используются промышленные диссипативные — типа Д2-17, Д2-18 и т. д. Отсчетные НЧ аттенюаторы выполняются тоже поглощающего типа, но упрощенной конструкции.

Принцип работы этих аттенюаторов [113, 119] состоит в следующем. Основным функциональным элементом аттенюаторов является изоляционная пластина с полупроводящей пленкой. Поверх пластины, часто выполняемой в виде подложки, наносится слой серебра *1* (рис. 6.16,*а*), замкнутый на корпус по всей длине. Контакт *2* соединяется с центральной жилой входного разъема, скользящий контакт *3* — с центральной жилой выходного разъема. Перемещение контакта *3* вдоль активного луча *1* аналогично перемещению ползунка *П* на рис. 6.16,*б*. При этом затухание зависит от отношения *l*/*A* и в принципе не зависит от поверхностного сопротивления слоя $\rho_{\text{п}}$, которое определяет входное и выходное (одинаковые) сопротивления аттенюатора. В процессе регулировки они остаются практически постоянными — это является одним из главных достоинств таких конструкций. Важно и то, что в них имеется принципиальная возможность работы на начальном участке без опасности возникновения каких-либо резонансных явлений плюс возможность не-

пользования во всем диапазоне частот единой шкалы, отградуированной на постоянном токе или на низких частотах.

Постоянную затухания для круглой пластины с однородным затуханием B' в децибелах на единицу угла перемещения ползунка можно рассчитать следующим образом:

$$B' \approx \frac{0{,}1}{\lg(r/r_в)} \left[\frac{\text{дБ}}{\text{град}}\right], \qquad (6.1.2)$$

где r, $r_в$ — наружный и внутренний радиусы пластины (рис. 6.1.6,*а*).

Диссипативные аттенюаторы типа Д2-17, Д2-18 и подобные им работают в диапазоне частот 0...3000 МГц, рассчитаны на максимальное затухание 60 (или 120 дБ), масса их составляет 1,5 ... 2 кг.

Обычно при отсчете по низкой частоте перед детекторами необходимо применять предустановку чувстви-

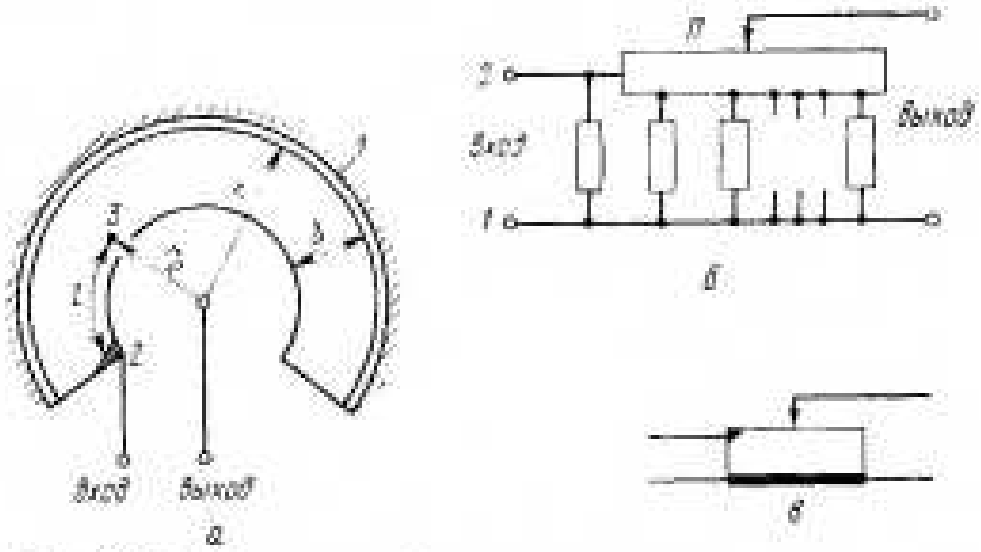


Рис. 6.1.6. Диссипативный аттенюатор:
а — обычное выполнение; *б* — принцип действия; *в* — условное обозначение.

тельности, выполняемую на диссипативных или предельных аттенюаторах СВЧ. В них постоянство градуировки во всем диапазоне частот может и не соблюдаться, диапазон регулировок обычно снижен до 10...20 дБ, но зато они должны быть просты и компактны. Обычно регулировка таких аттенюаторов выводится под шлиц и опечатывается после настройки в условиях специальных лабораторий. Примером такого аттенюатора может служить конструкция, приведенная на рис. 6.1.7 [96, 99]. Основой аттенюатора является пластина *1* с поглощающим слоем *6* (рис. 6.1.8) с нанесенными на нее контактами *2, 3, 4* в виде пленки из высокопроводящего материала (например, серебра). Контакты *2* и *3* используют-

ся для подключения к схеме, контакт 4 подключен к «земле», подвижный контакт 5 также подключен к «земле» и перемещается в направлении, пересекающем направление вход—выход. При этом он перекрывает фактически весь участок проводимости между входом и выходом. В реальных конструкциях аттенюаторов, однако, верхний предел затухания заметно ограничен двумя

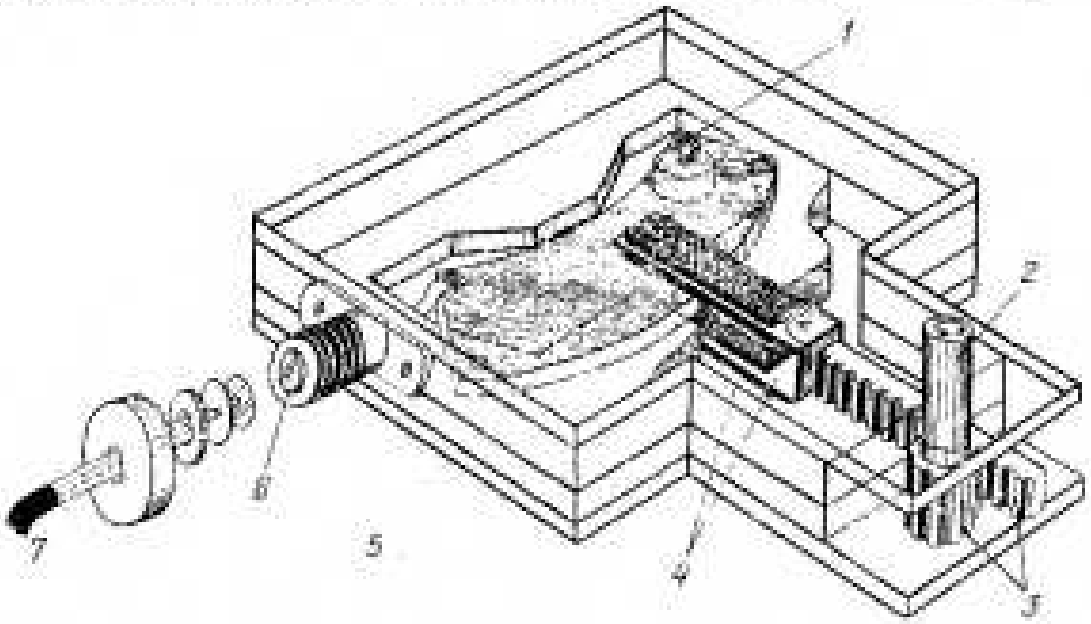


Рис. 6.1.7. Конструкция полупеременного аттенюатора с детекторной камерой:

1 — вход; *2* — ось вращения указателя; *3* — механизм перемещения; *4* — многоконтактный ползунок; *5* — пластина с поглощающим слоем; *6* — детектор; *7* — выход детектора.

факторами: «дискретностью» контактов и емкостными связями через свободную полость *9*. Для исключения этих связей в аттенюаторах часто применяется дополнительный ползунок *7*. Оба ползунка (*5* и *7*) имеют хороший контакт с внутренней плоскостью корпуса *8*.

Для удобства регулировки в простых аттенюаторах линейное перемещение контакта *5* часто заменяется вращательным (рис. 6.1.8). Зависимость затухания такого аттенюатора от угла поворота ротора приведена на рис. 6.1.9. Масса аттенюатора около 120 г, габариты 50×31×13 мм.

Прерыватели. К прерывателям (иногда их называют манипуляторами или модуляторами), предназначенным для работы в интенсиметрической аппаратуре, использующей пиковую индикацию (см. п. 6.1.3), предъявляются относительно мягкие требования в отношении глубин-

ны модуляции (она должна быть не менее 0,95 . . . 0,9) и тем более стабильности параметров модуляции (требования к стабильности частоты и скважности фактически отсутствуют). Параметры импульсов манипуляции: время паузы — доли миллисекунды, длительность фронтов — десятки микросекунд. Требованиями, общими для всех элементов интенсиметрической аппаратуры, являются: широкополосность, малые габариты и масса, малое потребление энергии. В качестве активного элемента

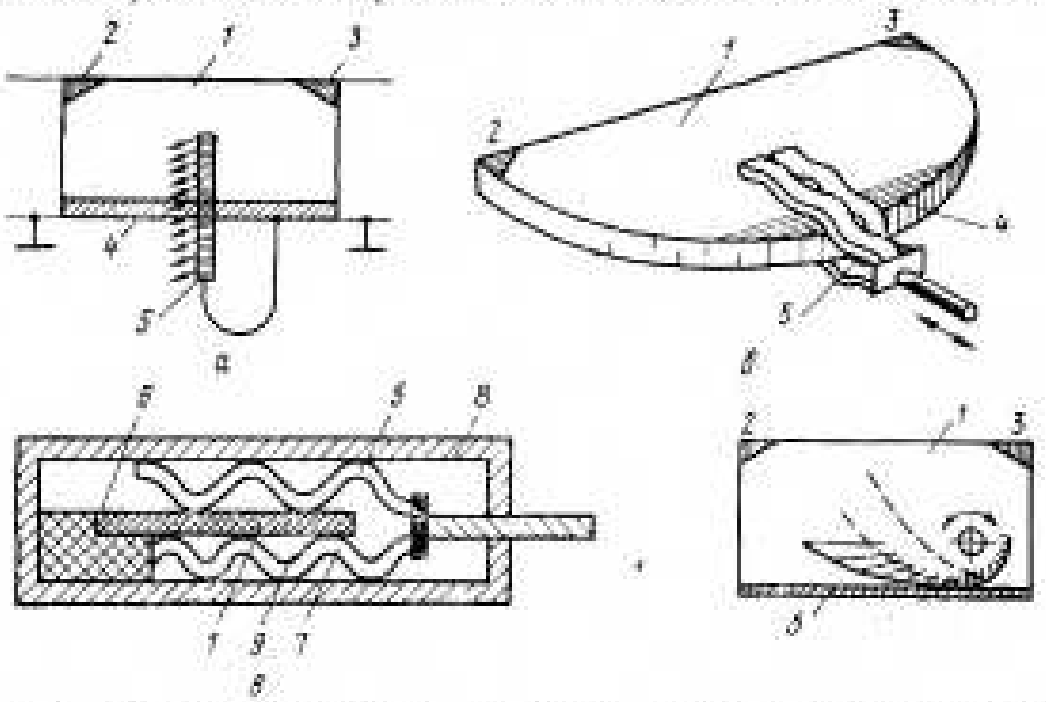


Рис. 6.1.8. К объяснению принципа работы полупеременного аттенюатора:

а — при движении ползунка 5 вверх происходят перекрытие проводимости между контактами 2 и 2; б — для улучшения технологичности конструкции контакт ползунка выполняется в виде набора гофрированных пластин; в — для уменьшения частотной зависимости конструкции применяются сдвоенные ползунки; г — аттенюатор с круговым перемещением ползунка. Позиции 1, 4—9 см. рис. 6.1.7.

в манипуляторах применяются обычные полупроводниковые детекторные диоды, специальные *p-i-n* структуры, газоразрядные приборы и т. п.

Схемы диодных выключателей достаточно подробно рассмотрены как в отечественной, так и в зарубежной литературе. Особенностью примененной в экспериментальном образце измерителя поля схемы является непосредственное последовательное включение диода-детектора и диода-модулятора, что значительно упрощает конструкцию камеры, но требует конструирования единственного разделительного элемента между чувствительным входом усилителя и выходом управляющего генера-

тора прямоугольных импульсов (дросселя) с предельно малыми активными потерями. Теория и расчет выключателей (прерывателей) на полупроводниковых диодах изложены в ряде работ (см. например, [140]).

Полупроводниковые детекторы. В детекторных интенсиметрах используются полупроводниковые диоды и термопары. Кроме диапазона частот, наиболее важными параметрами применяемых в современной интенсиметрической аппаратуре диодов являются чувствительность и электрическая прочность.

Чувствительность видеодиодов $\beta_д$ определяется как отношение выпрямленного тока или напряжения (соответственно при короткозамкнутом или разомкнутом вы-

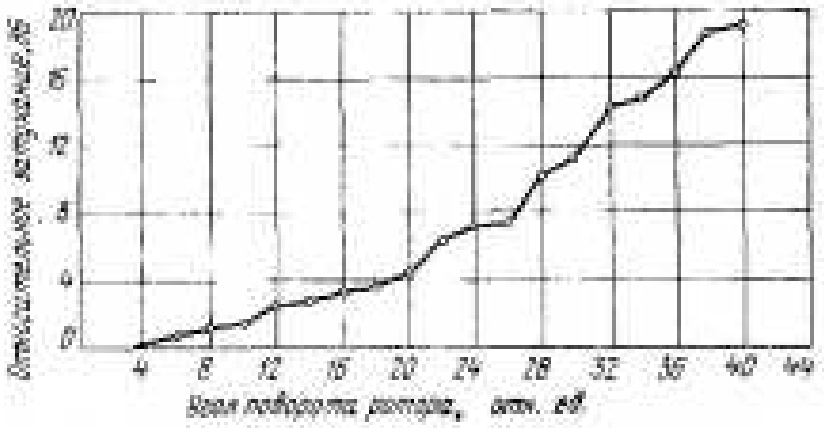


Рис. 6.1.9. Зависимость затухания от угла поворота ротора одного из экспериментальных образцов полупеременных аттенюаторов.

ходе) к поглощенной диодом СВЧ мощности. В лучших диодах чувствительность по току достигает 5,5 А/Вт и более, по напряжению — до 5 мВ/мкВт (см. [125, 196] и табл. 6.1.3).

Устойчивость диодов к электрическим перегрузкам принято характеризовать предельно допустимыми значениями непрерывной $P_{непр}$ или пиковой $P_{пик}$ СВЧ мощности, а также энергией импульсов W (если они очень короткие, не более 10^{-8} с). Выходное сопротивление детектора (видеосопротивление) $R_{вых}$ определяет характер входных цепей усилителя.

Температурная нестабильность существующих диодов, несмотря на значительный прогресс в этой части, остается все же относительно высокой, поэтому на практике ее приходится нейтрализовать схемными и конструктивны-

ми методами. Диод, как правило, помещен в глубине прибора, и быстрые колебания температуры сглаживаются тепловой массой конструкции, медленные колебания выбираются периодической поверкой усиления тракта с помощью встроенного генератора стабильного уровня; кроме того, в интенсиметрах, как правило, не применяются усилители постоянного тока, т. е. здесь имеет значение только стабильность дифференциальной чувствительности диода, которая во много раз выше стабильности прямого сопротивления диода по постоянному току (схемы и конструкции приведены в п. 6.1.6).

Конструктивно детекторы выполняются либо совместно с камерой манипулятора, либо отдельно. В последнем случае габариты устройства несколько увеличиваются, но условия согласования в диапазоне частот улучшаются, упрощается процесс замены диодов. Чувствительность со входа манипулятора при использовании диодов-детекторов типа Д604 оказывается равной 0,05...0,2 мВ/мкВт.

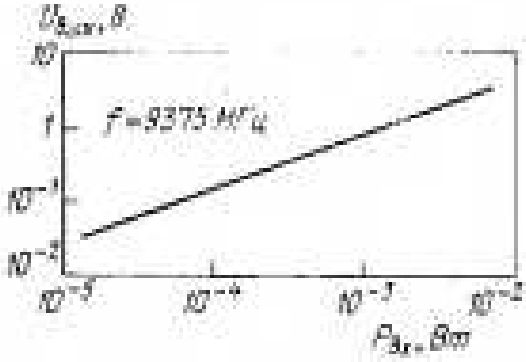


Рис. 6.1.10. Характеристика диодов МА-424 и МА-425.

В интенсиметрах, предназначенных только для измерения плотности непрерывной мощности, возможно использовать простейшие схемы детектор—усилитель тока — микроамперметр, обеспечивающие здесь достаточную точность и чувствительность. В США для этих целей разработаны специальные диоды (типа МА-424 и МА-425), для которых гарантируется высокая повторяемость зависимости выходного напряжения от входной СВЧ мощности в широком диапазоне значений от 10^{-5} до 10^{-2} Вт (рис. 6.1.10). Верхняя граничная частота этих диодов — 10 ГГц. Параметры некоторых отечественных СВЧ диодов приведены в табл. 6.1.3 [32а].

В интенсиметрах, усредняющих излучение за большое время — доли секунды и более, применяются тепловые преобразователи: болометры, термисторы, термопары. Главным недостатком термисторов является необходимость включения их в мост (постоянного или переменного тока). Основное достоинство термопреобразовате-

Таблица 6.1.3

Параметры некоторых серийно выпускаемых диодов СВЧ

Тип диода	Чувствительность по току, А/Вт	Видеосопротивление $R_{вид}$, кОм	Допустимые перегрузки P, Вт
Д603	4	0,3...0,9	0,2 (кратковременно 2 Вт)
Д604	2,5	0,5...0,9	0,3 (кратковременно 1 Вт)
Д607	4	0,4...1,2	0,1
Д608	4	0,4...1,2	0,15
Д608А	4	0,4...1,2	0,2
Д609	4	1...2	0,15
2А201А	5,5	0,4...1	0,3
2А202А	2,5	0,4...1	0,3

лей («термопар») — отсутствие сигнала на выходе при отсутствии сигнала на входе. Шумы термопары обычно очень низки и чувствительность устройств измерения на них определяется совершенством тепловой изоляции термопары. В этом смысле наиболее подходят вакуумные термопары, у которых, к тому же, как правило, разделены цепи входа и выхода. Существенным недостатком термопар является относительно низкая чувствительность по сравнению с болометрами и термисторами (приблизительно на порядок), что ограничивает их применение в измерителях мощности без усилителя. Параметры некоторых вакуумных термопреобразователей приведены в табл. 6.1.4.

Усилители. В зависимости от назначения интенсиметра (предназначен ли он для измерения только импульсных или также и непрерывных колебаний), а также наличия предварительной манипуляции сигнала на входе, в измерителях поля *с диодами* применяются как усилители постоянного тока, так и видеоусилители (см. п. 6.1.3).

В интенсиметрах с пиковой индикацией выход усилителя подключается ко входу пикового детектора с диодно-емкостной запоминающей ячейкой или амплитудного дискриминатора и расширителя импульсов на триггерах Шмидта (см. ниже). Для последних вариация длительности входных импульсов в пределах от постоянного тока до единиц или даже долей микросекунды (т. е. весь необходимый при измерениях диапазон длительностей) несущественна, поэтому чтобы амплитуда поступающих на его вход импульсов не зависела от их длительности, усиление после детектора необходимо прово-

Таблица 6.1.4

Данные отечественных термопреобразователей*

Тип термопары	ВХОД				ВЫХОД			Чувствительность $S = \frac{E_{вых}}{P_{вх}}$, мВ/мВт	Коэффициент преобразования в номинальном режиме, 10^{-4}
	Номинальный ток нагревателя $I_{н}$, мА	Сопротивление нагревателя $R_{нагр}$, Ом	Входная мощность $P_{вх}$, мВт	Допустимая перегрузка	Номинальная э.д.с. на выходе $E_{вых}$, мВ	Сопротивление термопары $R_{терм}$, Ом	Выходная мощность $P_{вых}$, мкВт		
ТВБ-1	1	600	0,6	1,50	25	40	0,039	4,3	65
ТВБ-2	3	200	1,8	1,50	5	35	0,18	2,8	109
ТВБ-3	5	150	3,7	1,50	10	35	0,71	2,8	192
ТВБ-4	10	60	6	1,50	12	15	2,4	2	400
ТВБ-5	20	13	11,7	1,50	12	15	2,4	1	202
ТВБ-6	30	7	17,5	1,50	12	5	7,2	0,63	419
ТВБ-7	100	3	30	1,50	12	5	7,2	0,4	240
ТВБ-8	300	1	90	1,50	12	3	14	0,13	133
ТВБ-9	500	0,8	200	1,2	12	2	18	0,06	90
ТВ-4	50	12	30	1,2	30	12	18,7	1	630
ТВ-5	75	8	45	1,2	30	8	28	0,48	623
ТВ-2	100	6	60	1,2	30	6	37,5	0,5	630
ТВ-14	250	2	125	1,2	30	2	113	0,35	910
ТВ-15	300	1,1	275	1,2	30	1,1	225	0,1	819
ТВ-16	1000	0,6	600	1,2	30	0,6	375	0,05	630

* Исходные данные для расчета этой таблицы взяты из работы В. И. Чернышева „Термоэлектрические приборы", М.—Л., Госэнергоиздат, 1953.

дить широкополосным усилителем (с шириной полосы для длительностей 1 мкс около 1 МГц). При использовании же диодно-емкостной ячейки в безламповых малогабаритных устройствах ее постоянную заряда не удается сделать менее 10^{-4} ... 10^{-5} с, поэтому в них граничную полосу усилителей можно выбирать не выше 10 ... 100 кГц. Если исходить из чувствительности детектора порядка 0,2 мВ/мкВт, начального затухания аттенюатора 10 дБ и эффективной площади зонда 2 см², чувствительность усилителя для минимальной (средней) ППМ 1 мкВт/см² должна составлять: по напряжению около 10^{-3} В и по току (при входном сопротивлении 1 кОм) 10^{-6} А. Такие усилители по своим параметрам относят к усилителям постоянного тока средней чувствительности [111], и их конструирование не представляет особой трудности.

При конструировании УПТ для работы в схемах измерителей поля, использующих *термопреобразователи* (в частности, в измерителях мощности дозы, см. ниже п. 6.1.6), к усилителям постоянного тока предъявляются

более жесткие требования в отношении чувствительности: она должна быть на один-два порядка выше, чем в УПТ измерителей поля с полупроводниковыми диодами. Такие усилители удается конструировать только с предварительной модуляцией сигнала на входе усилителя после термопреобразователя.

Для инерционных термопреобразователей (с постоянной времени единицы секунд) можно использовать обычную схему усилителя с периодическим преобразованием (по типу «меандр»), усилением по переменному току в узкой полосе частот и последующей демодуляцией. Для получения чувствительности по постоянному току порядка единиц микровольт (соответственно на СВЧ десятков микроватт) используют балансные диодные или транзисторные модуляторы. Для повышения чувствительности и стабильности усиления приходится применять обычные меры теплового выравнивания элементов схемы модулятора, а в некоторых случаях разрабатывать оптические или малоинерционные механические прерыватели.

Общим недостатком таких УПТ является узкая полоса частот — ниже частоты модуляции (это не позволяет применять их для работы с малоинерционными термодатчиками); относительно недавно [6,62] найден способ уменьшения этого существенного недостатка. Он заключается в том, что используется не один, а два канала усиления и «двухсторонний» преобразователь: за период частоты прерывания сигнал попеременно подается на входы каналов и синхронно снимается с их выходов. Однако это требует увеличения вдвое элементов усиления (соответственно и габаритов, и энергии питания); кроме того, в момент коммутации сигналов на выходе появляются биполярные импульсы напряжения, что заставляет применять для индикации либо осциллограф, либо усредняющий микроамперметр (ненужное инерционное звено).

Для широкополосного усиления сигналов, форму которых сохранять нет необходимости (а именно такой вариант мы имеем в нашем случае), можно применить манипуляцию сигнала со скважностью, близкой к единице, и индикацию сигнала на выходе видеоусилителя по пиковому уровню. Подобные системы, работающие с модуляторами СВЧ, описаны выше (в п. 6.1.4). Рассмотрим вкратце работу этих систем на низких частотах.

Нижняя граничная частота видеоусилителя (ВУС) $f_{\text{вус н}}$ выбирается несколько ниже частоты модуляции ($F_{\text{м}}$), верхняя ($f_{\text{вус в}}$) — полностью определяется верхней частотой усиливаемого сигнала $f_{\text{с в}}$. Время выключения сигнала $t_{\text{выкл}}=1/(3\ldots5)\ f_{\text{вус в}}$, скважность $q_{\text{м}}$ выбирается равной $1,1\ldots1,3$. Для уяснения принципа действия усилителя рассмотрим основные режимы его работы:

1. $f_{\text{вус в}} > f_{\text{с в}} \gg F_{\text{м}}$. Обычная работа внутреннего усилителя; модулятор практически не мешает процессу фиксации амплитуды сигнала индикатором.

2. $f_{\text{с в}} < F_{\text{м}}$. Именно для работы в этом режиме и применяется на выходе ВУС индикатор пикового уровня с памятью (ИПУ). Время запоминания сигнала ИПУ $T_{\text{п}} \gg 1/F_{\text{м}}$. При значениях допустимого запаздывания момента отсчета (наблюдения) $t_{\text{н}}=T_{\text{п}}=0{,}2\ldots0{,}5$ с частота модуляции обычно выбирается равной $50\ldots100$ Гц. Таким образом, за время $t_{\text{н}}=0{,}2\ldots0{,}5$ с индикатором пикового уровня будет зафиксировано наибольшее из $10\ldots50$ значений амплитуды сигнала. Для $f_{\text{с}}=F_{\text{м}}$ снижение чувствительности системы возможно только при постоянном попадании сигнала в короткие паузы, когда вход видеоусилителя отключен. Это возможно при соблюдении условия длительной синхронности и синфазности усиливаемого сигнала и модуляции. Имея в виду, что в общем случае они друг от друга не зависимы, это условие можно считать практически не выполнимым, а вероятность появления ошибки по этой причине очень малой; она оценивается величиной

$$\frac{(1-1/q_{\text{м}})^2}{T_{\text{п}}F_{\text{м}}\left|F_{\text{м}}/F_{\text{с}}-1\right|+(1-1/q_{\text{м}})}$$ (см. сноску на стр. 216).

В усилителях измерителей поля можно применять как обычные «линейные» усилители, так и усилители с логарифмированием амплитудной характеристики [25]. В первом случае для повышения шкального динамического диапазона (более $8\ldots10$ дБ) приходится применять источники питания с высоким напряжением ($9\ldots24$ В вместо обычных $4\ldots6$ В), либо выводы от промежуточных каскадов усилителя и специальные регистраторы, обычно с индикацией сигнала по пиковому уровню.

Пиковые регистраторы. Уровень ППМ, измеренный с помощью СВЧ интенсиметров, может быть зарегистрирован дискретными или аналоговыми устройствами.

Аналоговая индикация на пиковых детекторах с применением стрелочных индикаторов (рис. 6.1.11,*а*) удобна для наблюдения, особенно в момент поиска максимума при облучении антенны интенсиметра медленно-нестационарными полями. Схемы регистраторов с диодно-емкостной ячейкой относительно просты [82], однако им присущи некоторые недостатки, ограничивающие их

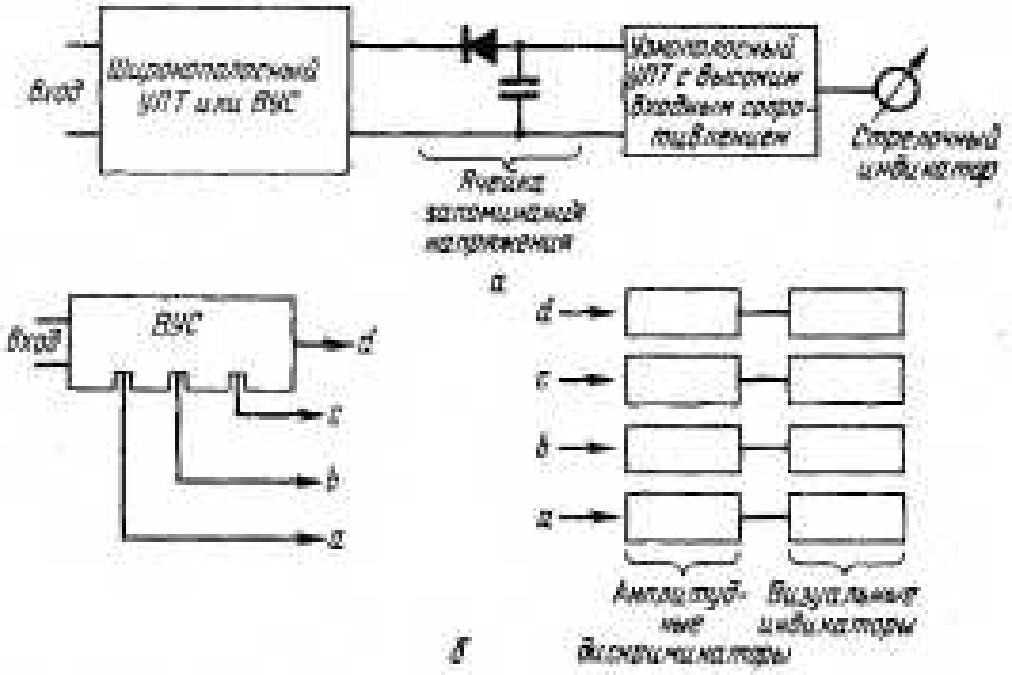


Рис. 6.1.11. Схемы пиковой регистрации, применяемые в интенсиметрах СВЧ.

использование в интенсиметрической аппаратуре: трудность регистрации простыми схемными методами пикового напряжения одиночных импульсов в интервале длительностей 10^{-3} с и ниже при запоминании на 1...2 с (время запоминания ограничивается здесь не столько временем визуального отсчета, сколько инерционностью стрелочных приборов); малый динамический диапазон (шкальный ДД ограничивается отношением напряжения источника питания к минимальному выходному напряжению, при котором обеспечивается работа запоминающей ячейки; для обычных диодов это напряжение равно 0,5...4 В); необходимость применения стрелочных показывающих приборов и связанные с этим эксплуатационные заботы: необходимость оберегать прибор от тряс-

Сравнительная характеристика устройств визуальной [в пиковых

Тип показывающего прибора (визуализатора)	Подтипы	Характеристика по току или напряжению	Инерционность срабатывания, с	Внутренняя память	Яркость шкалы (экрана), нт	Цвет свечения
Стрелочные магнитоэлектрические	Малоинерционные Обычные Ударопрочные	Линейная, редко—почти логарифмическая	0,3...0,5 1...2 2...4	Нет	С внешним освещением	
Электронно-оптические	Сетевые Батарейные	Почти линейная Пороговая или почти линейная	10^{-3}	Нет	200...1000 5...10	Зеленый
Газоразрядные	Диоды Триоды	Пороговая	10^{-5}...10^{-6}	Есть	10^{3}...10^{5}	Оранжево-красный
Электролюминесцентные	Порошковые индикаторы		10^{-3}	Нет	20...100	От синего до красного
	Инжекционные электролюминесцентные ячейки	Квадратичная	10^{-7}...10^{-8}		5...500	Красный—700 нм зеленый—565 нм оранжевый—620 нм
Электрохимические	Диоды		10^{-3}	Нет	С внешним освещением	

ки, регулярная проверка и т. п. Применение в качестве показывающих индикаторов электронно-оптических приборов ограничено низкой экономичностью, необходимостью в источнике высокого напряжения и т. д. (см. далее).

Использование *дискретной регистрации* (рис. 6.1.11,*б*) ухудшает реальную точность интенсиметра на величину, приблизительно равную интервалу индикации, однако в ряде случаев это не имеет существенного значения, если интервал регистрации не превышает 1 ... 3 дБ. Несомненным преимуществом дискретной индикации является возможность получать большой шкальный динами-

Таблица 6.1.5

индикации, рекомендуемых для использования регистраторах

Мощность по цепи управления, Вт	Мощность цепи питания, Вт	Напряжение управляющего сигнала, В	Напряжение источника (ов) питания, В	Объем прибора (приблиз.), см³	Срок службы, тыс.	Обычная схема преобразователя импульсного сигнала	Источник
10^{-6}...10^{-4}		10^{-2}...1		20...150 100...300	—	Пиковый детектор или линейка амплитудных дискриминаторов	[36, 80]
10^{-4}...10^{-5}	3...6	6...10	6,3...250	20...40	0,5...1	Повышающий трансформатор + + диодно-емкостная ячейка	[197]
10^{-4}...10^{-6}	0,2...0,4	3...15	1,1...90	1...4	—		
0,01...1 10^{-6}...10^{-8}	0,1...1	60...80 2...20	150...320	1...4	1...100	Повышающий трансформатор и делители	[71]
Зависит от частоты. Входная емкость 100...10 000 пФ		15...80		0,1...1	Не ограничен	Делители + линейка амплитудных дискриминаторов	[44]
(0,02...1)10^{-4}		1,8...3,5		10^{-3}			[44] [45] [63]
$1 \cdot 10^{-3}$		10...50		10^{-3}...10^{-4}			[64]

ческий диапазон (до 20 ... 30 дБ), малая инерционность (интенсиметры фактически становятся моноимпульсными измерителями поля), простота в эксплуатации.

Амплитудные дискриминаторы для регистрации превышения заданного уровня применяются в измерительной технике довольно часто [36, 56, 111]. Триггеры Шмидта на транзисторах с граничной частотой по α 200 ... 400 МГц, используемые в режиме пиковой амплитудной дискриминации, надежно срабатывают во всем диапазоне длительностей (от $2 \cdot 10^{-2}$ до 10^{-6} с) и позволяют расширить импульс до необходимых 0, 3 ... 1 с. Они просты по устройству и надежны в работе. По данным [111],

временной дрейф такого триггера при работе в схеме индикатора отклонений не превышает 1% за 24 ч и дополнительно 1% от температуры в диапазоне от 10 ... 47 °С.

Реализация всех преимуществ дискретной регистрации оказывается возможной только при использовании малоинерционной визуальной индикации, например, на электрооптических (ЭОП), газоразрядных (ГЗ) или электролюминесцентных (ЭЛМ) приборах.

Несомненным достоинством ЭОП индикаторов является возможность наблюдения сигнала в предпороговой (предотсчетной) области (во время поиска максимума сигнала, при настройках и т. п.) и экономичность по цепи управления, однако они дороги и неэкономичны по цепи питания. Яркость свечения батарейных ЭОП индикаторов недостаточна для наблюдения даже при умеренном свете (см. табл. 6.1.5). Сетевые варианты индикаторов могут применяться только в устройствах с внешними источниками питания.

Газоразрядные приборы (лампы с холодным катодом) применяются в основном в схемах с высоковольтными цепями питания, если стабильность и точность отсчета не имеют решающего значения. Эти приборы относительно дешевы, могут работать при длительностях управляющих импульсов порядка $10^{-8}...10^{-6}$ с и токе $10^{-10}...10^{-8}$ А, но весьма неэкономичны по цепи питания, трудно сопрягаются с транзисторными схемами; в частности, для повышения управляющего напряжения приходится применять трансформаторы, резко ухудшающие частотные свойства всего устройства. Достоинством газоразрядных приборов является возможность запоминания информации.

Из всего имеющегося к настоящему времени арсенала электролюминесцентных приборов [44] для работы в схемах транзисторных пиковых регистраторов подходят инжекторные электролюминесцентные ячейки на основе фосфида галлия и карбида кремния. Фосфид-галлиевые светодиоды излучают в широкой полосе частот с максимумами в красно-оранжевой (720 мкм) и зеленой (565 мкм) части спектра. Эффективность зеленого излучения значительно ниже красного, но из-за особенности субъективного восприятия цвета яркость «зеленого» диода почти такая же, как и красного. Начальное напряжение свечения фосфид-галлиевых диодов — около 1,8...2,05 В. Яркость GaP-диодов оказывается в пределах от нескольких десятков до нескольких сот нит.

Карбид-кремниевые ячейки работают при начальном напряжении 2,3...3,5 В и при желтом излучении обеспечивают 10...20 нт. Мгновенная яркость при длительности импульса 100 мкс, частоте повторения 1 Гц и пиковом токе несколько ампер достигает 10^4 нт. Отечественной промышленностью серийно выпускаются светодиоды типа АЛ-102 и КЛ-101, излучающие свет в красном, зеленом и желтом частях спектра. Лучшие из известных светодиодов обеспечивают непрерывную яркость до 400 нт при мощности по цепи питания 1,5 мВт, токе 10 мА, напряжении 1,5 В [45].

Несмотря на явно выраженную прямую и достаточно «гладкую» зависимость яркости свечения электролюминесцентных приборов от тока, их удается использовать только как пороговые элементы (хотя применение светодиодов в линейном режиме в общем-то известно [94]). Выбор показывающего индикатора во многом зависит от дан-

ных схемы предварительного преобразования сигнала. Ориентировочные данные о структуре таких схем вместе со сравнительными характеристиками индикаторов включены в табл. 6.1.5.

Стрелочные индикаторы могут применяться и совместно с амплитудными дискриминаторами. В этом случае напряжение с выхода каждого такого дискриминатора (их количество не менее 10...15 во всем требуемом шкальном динамическом диапазоне прибора) подается через соответствующий делитель на вход милливаммерметра. Это позволяет использовать преимущества стрелочных приборов (простота отсчета, эстетичность и т. п.) при минимальных требованиях к самим приборам: он может быть весьма грубым, малочувствительным и т. д. Время памяти дискриминаторов при этом уве-

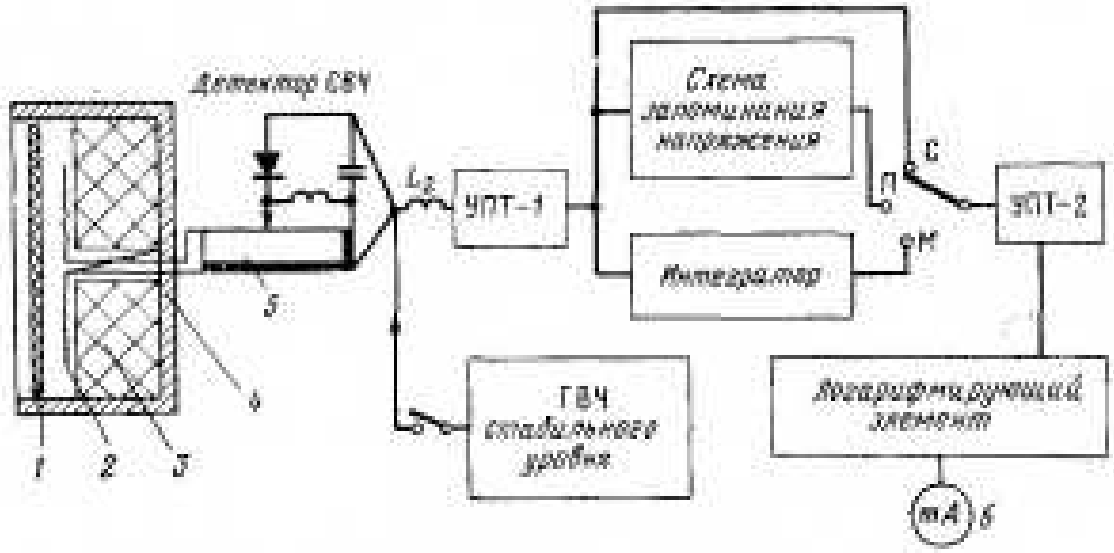


Рис. 6.1.12. Функциональная схема измерителя поля ИП-3425:

1 — плечочный аттенюатор; *2* — антенна; *3* — радиопоглощающий материал; *4* — экран; *5* — аттенюатор; *6* — показывающий прибор; С — «стационарное поле»; П — «два прохода»; М — «мощность дозы».

личивается до 2...3 с (время одного цикла измерения, включая установку направления и поляризационный поиск) или делается неограниченным с принудительным сбросом.

Кроме визуальных регистраторов могут применяться и слуховые индикаторы, включенные таким образом, что в предотсчетной области, при поисках максимума, можно прослушивать прямой сигнал с выхода усилителя, а в точке отсчета на вход слухового индикатора подключается напряжение с выхода основного измерительного устройства — амплитудного дискриминатора отсчетного уровня.

6.1.6. Применение принципов конструирования аппаратуры на примере нескольких приборов. Рассмотренные принципы работы измерителей поля реализованы в нескольких типах конкретных приборов — интенсиметров и мозиметров.

Один из первых разработанных интенсиметров — измеритель поля ИП-3425 — выполнен по принципу изме-

рительных систем с наводкой, с отсчетом по шкале аттенюатора СВЧ (рис. 6.1.12). Заданный уровень фиксируют стрелочным показывающим прибором, проградуированным, как и шкала отсчетного аттенюатора, в децибелах. Для удобства работы прибор выполнен таким образом, что угол отклонения стрелки приблизительно пропорционален логарифму тока. Ноль шкалы аттенюатора (в децибелах) соответствует предельной чувствительности прибора, определяемой в мкВт/см² для каждого типа излучателя по имеющимся графикам или сравнением с измерителем поля ПО-1. Интенсиметр

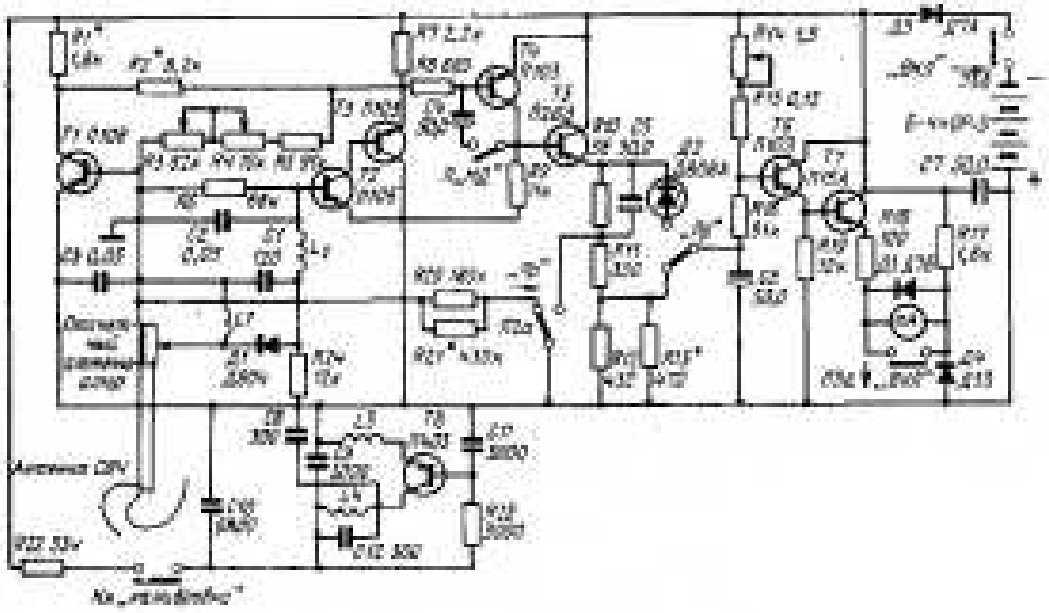


Рис. 6.1.13. Принципиальная схема ИП-3425.

имеет три режима работы: измерение стационарного поля, измерение антенных полей «на проходе», т. е. без остановки перемещения диаграммы антенны, и, наконец, измерение мощности дозы периодического поля с небольшими пределами изменения уровня. В первом режиме два усилителя постоянного тока, входящие в состав схемы измерителя, включены последовательно; в режиме измерения «на проходе» второй УПТ используется в схеме пикового детектора; в третьем режиме один из каскадов первого УПТ включается по схеме интегратора с глубокой отрицательной обратной связью через дополнительную емкость база — коллектор.

Генератор высокой частоты (ГВЧ) стабильного уровня используется для контроля усиления схемы в заданной рабочей точке. В приборе применена широко-

полосная квазипериодическая антенна, выполненная в виде плоской двухзаходной спирали с замедляющей структурой. Антенна помещена в поглощающую полость, представляющую собой открытый с одной стороны круглый цилиндр, заполненный радиопоглощающим материалом. Такая конструкция антенного узла позволяет значительно уменьшить заднюю половину диаграммы антенны, уменьшить эксцентриситет эллипса поляризации диаграммы направленности и улучшить направленные характеристики зонда.

Принципиальная схема прибора приведена на рис. 6.1.13. Первый УПТ с термокомпенсацией выполнен на транзисторах *Т1...Т3*. Эмиттерный повторитель на транзисторах *Т4, Т5* при работе в ре-

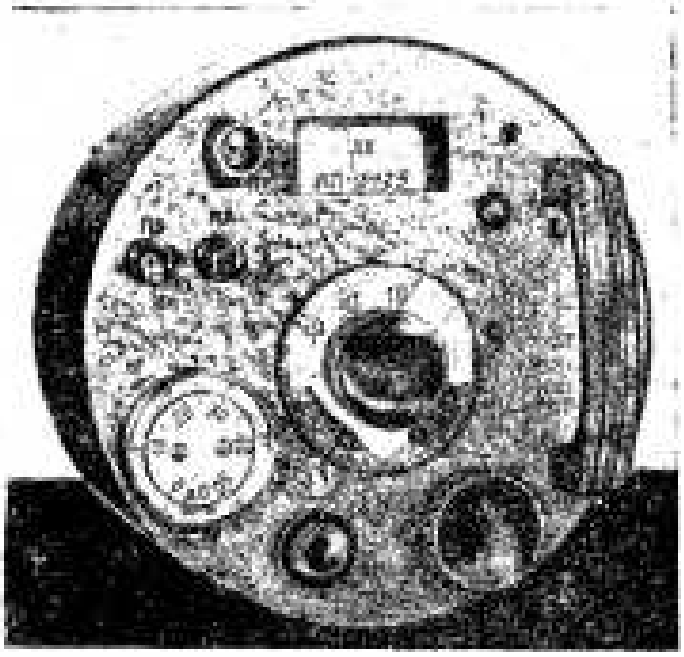


Рис. 6.1.14. Внешний вид ИП-3425.

Слева внизу видна подвижная номограмма для пересчета затухания аттенюатора в значения ППМ.

жиме измерения полей на проходе обеспечивает необходимый зарядный ток конденсатора *С6*, который совместно со вторым усилителем постоянного тока (на транзисторах *Т6* и *Т7*) обеспечивает запоминание амплитуды сигнала на время, необходимое для успокоения стрелочного прибора (около 1 с). Конденсатор *С4* включается в режиме измерения мощности дозы. Генератор стабильного уровня собран на транзисторе *Т8*.

Конструктивно прибор выполнен в едином штампованном алюминиевом корпусе, открытом со стороны приемной антенны. Внутри корпус разделен на два отсека: антенный и монтажный. Все необходимые ручки управления (установка чувствительности, регулировка аттенюатора), кнопка включения контрольного генератора, пере-

ключатели режимов работы и крышка камеры источника питания находятся со стороны оператора (рис. 6.1.14). Кроме того, на лицевой панели прибора находится пересчетное устройство, помогающее по данным (в децибелах) на шкалах аттенюатора и показывающего прибора снимать показания ППМ в микроваттах на квадратный сантиметр.

Для контрольных целей при работе только с импульсными полями применять приборы типа ИП-3425 нецелесообразно (прежде всего из-за плохой температурной стабильности схемы). В этих случаях используются измерители поля ИП-3466, позволяющие измерять интенсивность поля в диапазоне длительностей импульсов от 3 мкс до 20 мс. Как и ИП-3425, прибор выполнен по типу систем с наводкой и фиксацией заданного уровня с помощью стрелочного показывающего прибора.

В приборе ИП-3466 (схема приведена на рис. 6.1.15) применен только один режим работы — по пиковому уровню, но при этом вследствие повышенного входного сопротивления второго УПТ (транзисторы *Т6*, *Т7*, *Т8*) оказалось возможным снизить емкость

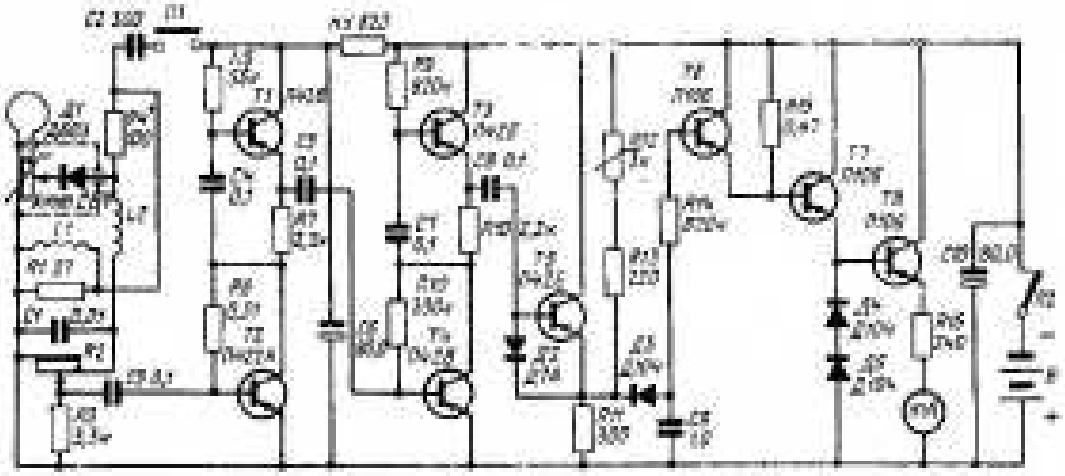


Рис. 6.1.15. Принципиальная схема измерителя поля ИП-3466.

µА — показывающий прибор типа М-4203; *Б* — 4 элемента РЦ-83К; *П1* — кнопка проверки чувствительности; *R12* — установка чувствительности; *Атт* — предустановка чувствительности на СВЧ; *R2* — отсчетный аттенюатор.

конденсатора памяти *С9* до 1 мкФ и значительно повысить экономичность схемы заряда, поэтому режим измерения по пиковому уровню можно использовать для измерения как полей «на проходе», так и стационарных излучений.

Видеоусилитель прибора выполнен на двух ячейках с динамической нагрузкой [51], обеспечивающей усиление около 50 дБ. Особенностью схемы прибора является отсчет показаний по шкале низкочастотного аттенюатора *R2*. Градуировка шкалы оказалась близкой к логарифмической и почти не зависимой от длительности входных импульсов. Предустановка чувствительности выполняется СВЧ аттенюатором диссипативного типа, выполненным совместно с детекторной камерой. Допущение значительной частотной зависимости в вывод регулировки «вод шлиц» позволило заметно упростить конструкцию аттенюатора, в несколько раз уменьшить его габариты и вес.

В приборе применена антенна-зонд в виде одновитковой рамки диаметром 15 мм с компенсацией электрической составляющей (конструкция антенны рассмотрена выше). Управление прибором максимально упрощено. На лицевой панели прибора (рис. 6.1.16) введены только регулировка отсчетного аттенюатора (шкала градуирована непосредственно в мкВт/см^2) и тумблер включения. Показывающий прибор выполняет три функции: индикацию напряжения питания (левая часть шкалы;

Рис. 6.1.16. Внешний вид измерителя поля ИП-3466.
Справа — отсчетная шкала аттенюатора.

показания устанавливаются сразу же при включении питания), фиксацию момента точного отсчета (положение «1») и отклонения от отсчетного уровня (правая часть шкалы).

В последнее время разработаны варианты интенсиметров с применением в качестве визуальных индикаторов электролюминесцентных фосфид-галлиевых диодов. На рис. 6.1.17 приведена функциональная схема такого интенсиметра (ИП-3445 *). В нем люминесцентные диоды используются для наблюдения отсчетного уровня (при котором производится отсчет по шкале аттенюатора) и отклонение от него в пределах до 6 раз. Отсчет уровней производится по шкале плавно-переменного аттенюатора (типа Д2-18). Аттенюатор, включенный после детектора, используется только для подстройки чувствительно-

* В разработке интенсиметров ИП-3466 и ИП-3445 принимали участие В. С. Блументаль, И. Ф. Смолькин, Л. В. Толстой и Н. Н. Фелицын (см. также [93]).

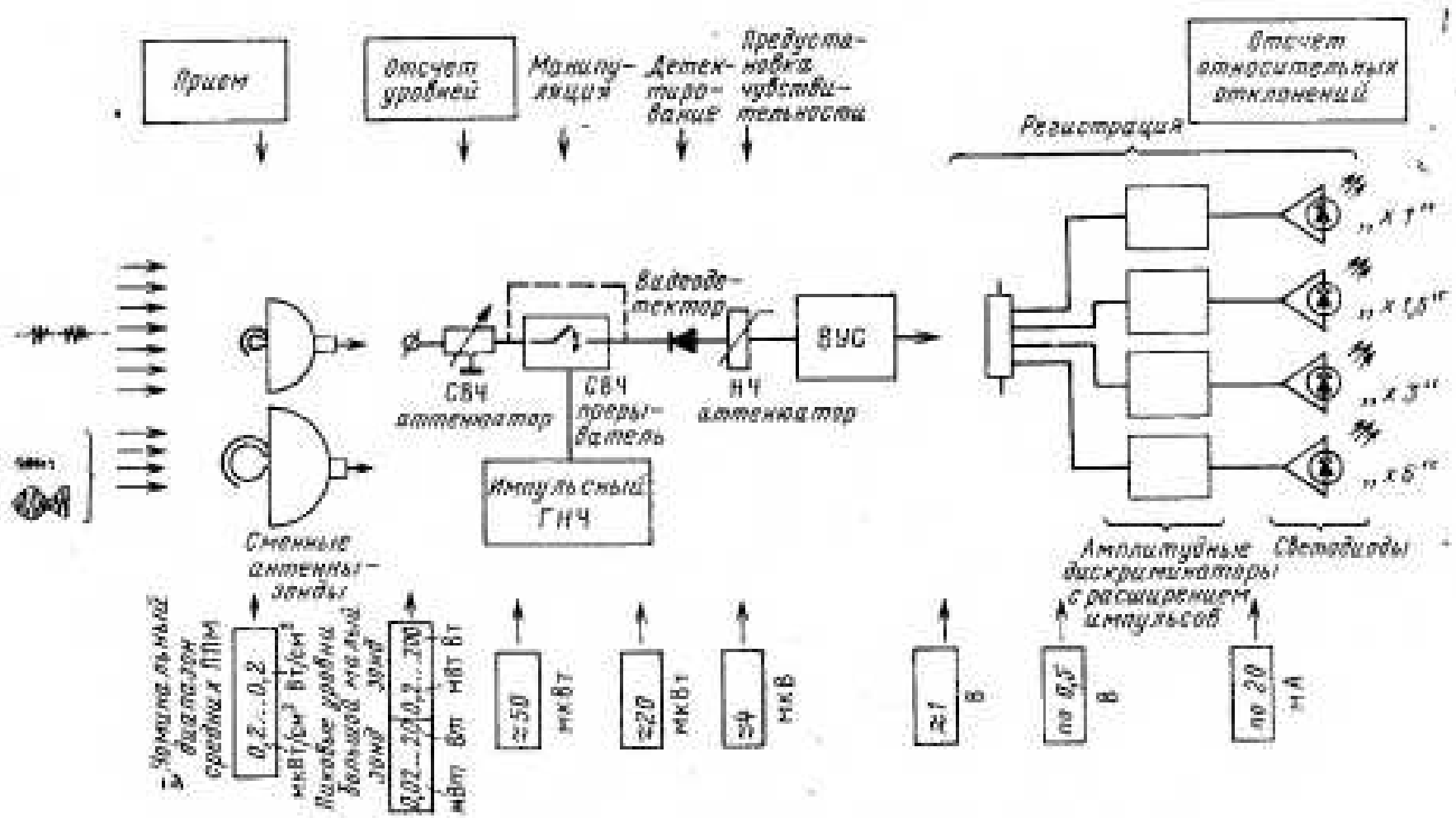


Рис. 6.1.17. Функциональная схема универсального интенсиметра группы И.
Вокруг антенны ориентировочные значения функциональных уровней.

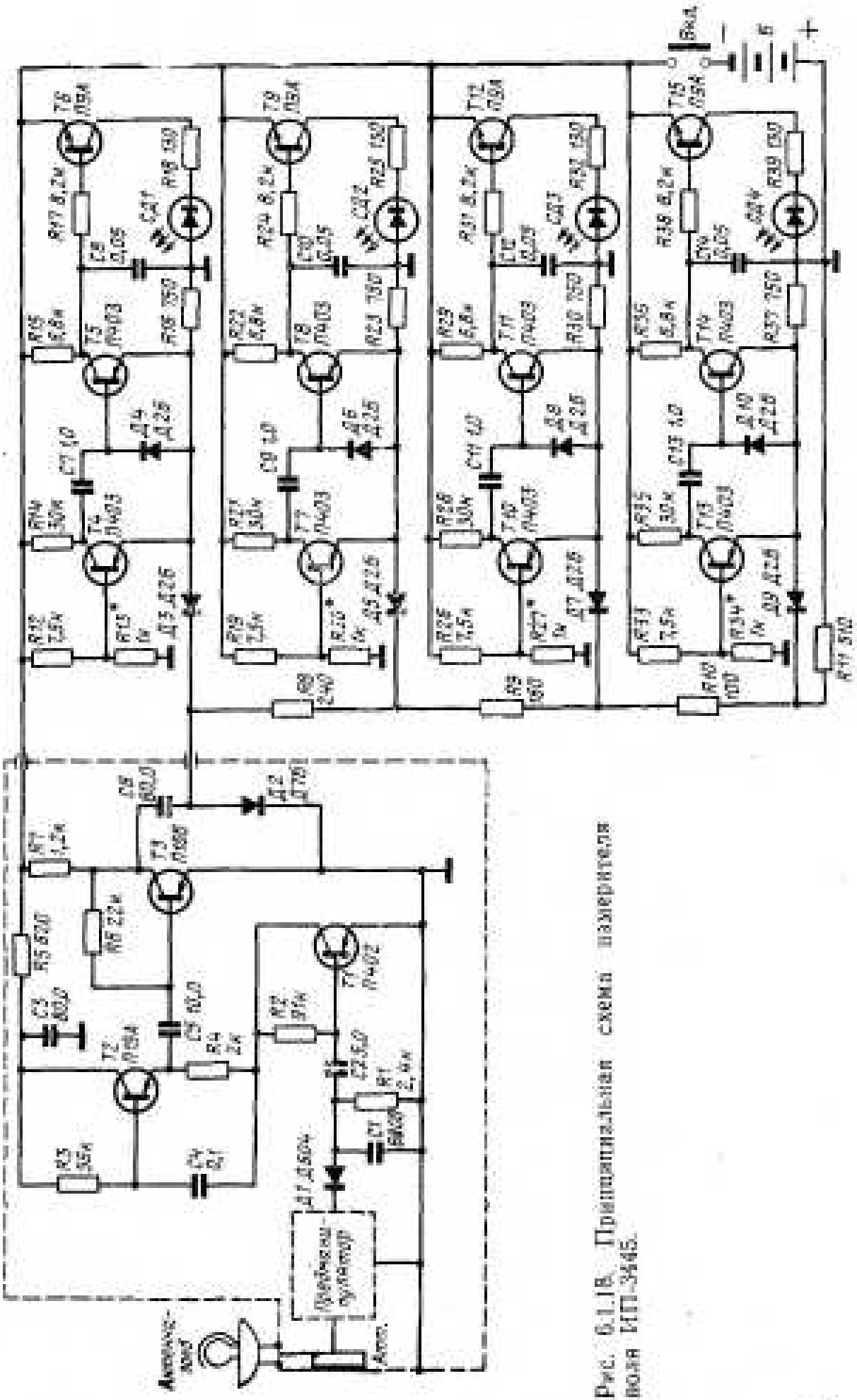


Рис. 6.1.18. Принципиальная схема пазвонителя ВОЛНА ИТП-3445.

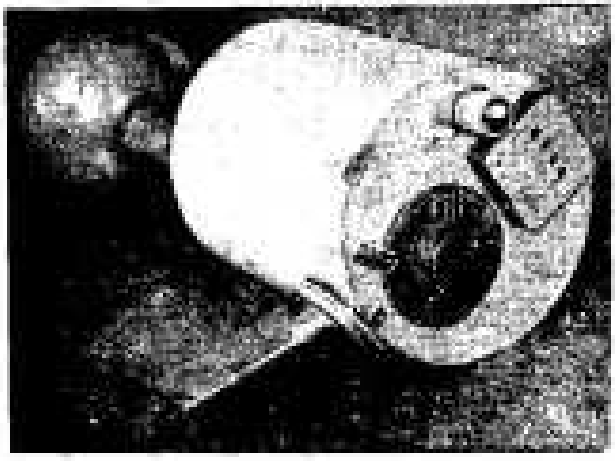


Рис. 6.1.19. Внешний вид измерителя поля ИП-3445.

сти. Видеоусилитель и антенна-зонд ИП-3445 не отличаются от использованных в приборе ИП-3466. Принципиальная схема ИП-3445 приведена на рис. 6.1.18, а внешний вид на рис. 6.1.19. Отличительной особенностью схемы ИП-3445 является включение перед детектором прерывателя на диоде, управляемом импульсным генератором НЧ. Применение в качестве детекторов сигнала полупроводниковых диодов позволило в значительной степени поднять чувствительность аппаратуры, увеличить шкальный динамический диапазон, но ее применение определенным образом усложнило обработку результатов измерений, ибо там, где кроме пиковых уровней необходимо знать средние значения ППМ, приходится ставить задачу измерения или расчета скважности воздействия, а это не всегда просто выполнить. Полный переход на нормирование по дозе и по мощности дозы требует создания специальной аппаратуры, автоматически учитывающей временные факторы. Измерение дозы нами отнесено к классу автоматических или автоматизированных методов и описывается ниже (см. § 6.3). Здесь мы кратко остановимся на методах реализации задачи измерения мощности дозы, т. е. ППМ, усредненной за определенное время (от долей секунд до десятков минут, в зависимости от возможностей и принятых нормативов).

Применение для измерения мощности дозы полупроводниковых диодов неизбежно приводит к значительным ошибкам усреднения, так как заставляет использовать очень широкий участок амплитудной характеристики диода, что снижает запас его прочности и затрудняет согласование диода с трактом. Наилучшим детектором для этих целей оказывается термопара. В связи с относительно низкой чувствительностью термопар (около 1 мВ/мВт) приходится использовать чувствительные усилители с преобразованием сигнала на входе

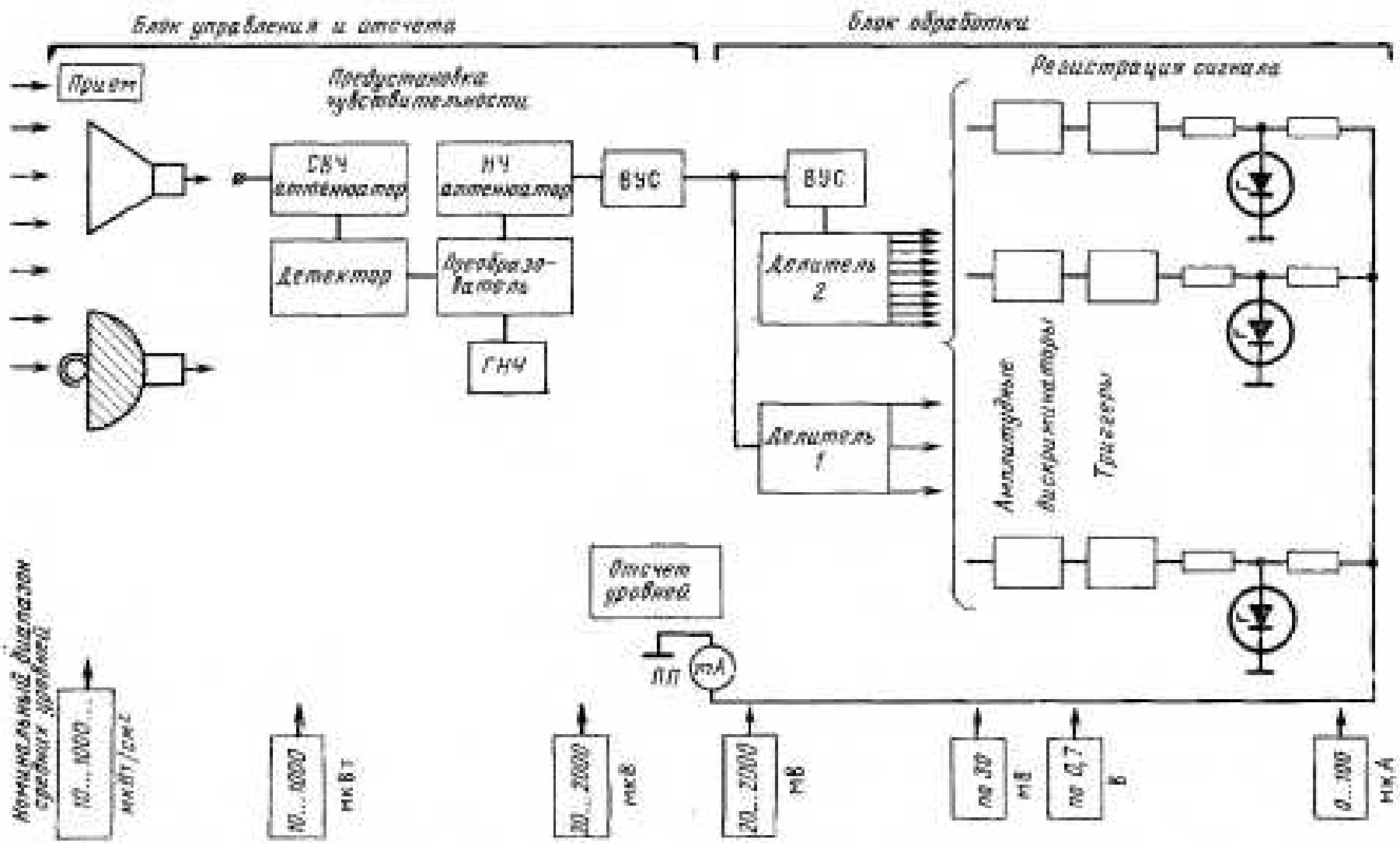


Рис. 6.1.20. Функциональная схема измерителя мощности дозы с преобразованием сигнала на входе УПТ и с пиковой дискретной регистрацией.

Внизу — ориентировочные значения функциональных уровней.

(рис. 6.1.20). Некоторая усложненность узла преобразователя компенсируется большим удобством по синтезу схем амплитудного дискретного логарифмирования сигнала. Это позволяет достаточно просто реализовать прямой отсчет, уместив на одной шкале регистратора диапазон амплитуд, соответствующих двум-трем декадам изменения входного сигнала.

Основным, если не единственным, усредняющим звеном в измерителе мощности дозы является термопара, поэтому выбор ее типа в значительной степени предопределен требованиями нормативов, точнее, величиной нормируемого времени усреднения ППМ $T_н$ (см. п. 3.2.2). В идеальном случае постоянная времени термопары $\tau_{тп}$ должна полностью соответствовать времени $T_н$, однако обычно $\tau_{тп} \ll T_н$, поэтому результаты измерений приходится подвергать некоторой обработке, хотя она несравненно проще, чем при работе с детекторными интенсиметрами.

В схемах с использованием термопар регистрация сигнала также может быть выполнена как по пиковому уровню с памятью, так и по среднему уровню, однако первая предпочтительнее для облегчения отсчета максимальных значений ППМ при поиске мест просачивания (обычный режим работы при измерении внутренних полей), а также совершенно необходима для регистрации кратковременных сигналов.

6.1.7. Поверка измерителей ППМ. В настоящее время поверка измерителей плотности потока СВЧ мощности и измерителей напряженности поля производится путем измерения поверяемым прибором образцового поля (метод образцового поля) или попеременным измерением образцовым и поверяемым приборами поля, созданного вспомогательной антенной (метод образцовой антенны). Метод образцовой антенны состоит в том, что стабильное поле, излучаемое вспомогательной антенной, поочередно измеряется поверяемым прибором и образцовым измерителем. Различия между результатами и характеризуют погрешность поверяемого прибора. Достоинством методов являются относительно высокая точность, хорошая разработанность (теории и аппаратуры), а для метода образцовых антенн — возможность относительно простой реализации.

Точность поверок по указанным методам достигает 5...7% в свободном поле и 10...12%, если в помещении находятся какие-либо предметы [15]. Эта точность вполне достаточна для поверки ПО-1. Для измерителей типа ИП-3425, ИП-3445 и т. д. эта точность излишняя, тем более если иметь в виду, что она оплачивается высокой стоимостью аппаратуры и очень низкой производительностью. Возможность уменьшить точность поверки измерителей позволяет применять упрощенные методы, одна из которых состоит в том, что поверка проводится методом образцовой антенны, но излучаю-

щая и приемная антенны располагаются на малом расстоянии друг от друга, а для уменьшения взаимодействия между антеннами пространство между ними заполняется радиопоглощающим материалом (РПМ). В результате этого мешающее действие окружающих предметов делается пренебрежимо малым, а площадь рабочего помещения фактически не имеет значения.

Способ поверки измерителей при заполнении пространства между антеннами предложен относительно недавно и сейчас находится в стадии изучения [77], поэтому здесь мы рассмотрим только принципы, на которых он основан. В процессе поверки методом образцовой антенны возникают два типа переотражений: переотражения между излучающей и приемной антеннами и переотражения между антеннами и окружающими предметами. При помещении между передающей

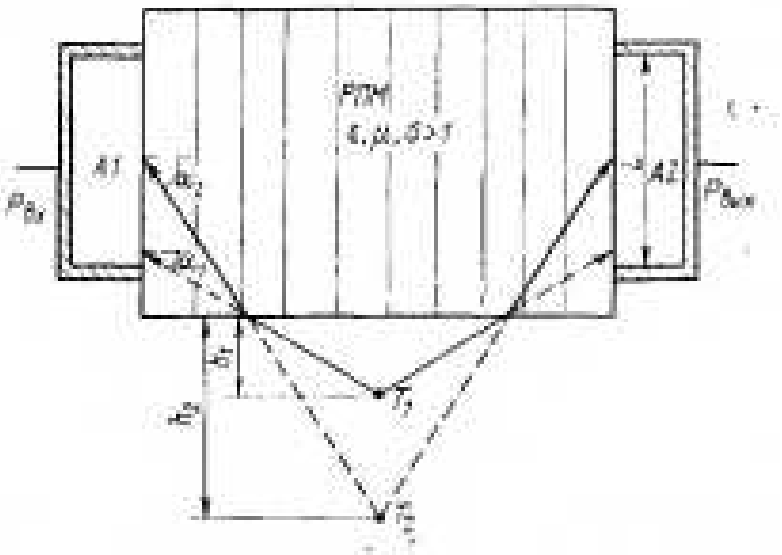


Рис. 6.1.21. Влияние побочных переотражений на систему «антенна—РПМ—антенна».

T_1 — точка встречи лучей при работе антенны на РПМ; T_2 — точка встречи лучей при работе антенны на свободном пространстве.

$A1$ и приемной $A2$ антеннами поглощающего материала M (рис. 6.1.21) взаимное влияние антенн уменьшается. Нетрудно видеть, что коэффициент уменьшения связи между антеннами прямо пропорционален затуханию в материале $K_м$, а влияние поверяемой антенны на излучающую снижается в $K^2_м$ раз. При этом влияние на точность сравнения неравенства геометрических размеров образцовой $L_о$ и поверяемой $L_п$ антенн оказывается не большим, чем в свободном поле. Действительно, при одинаковой конструкции и при относительно близких размерах и форме образцовой и поверяемой антенн отношение мощностей на выходе антенн $P_{вых\,о}/P_{вых\,п}$ практически не зависит от структуры поля, а определяется только отношением их коэффициентов усиления. Следует особо подчеркнуть, что если поглощающий материал обладает также и преломляющими свойствами (материалы с $\varepsilon>1$, $\mu>1$), то происходит уплощение фронта поля в раскрыве приемных антенн и как следствие — уменьшение погрешностей даже при усилении неравенства $L_о^2/L_п^2 \neq 1$.

Наконец, применение материалов с $\varepsilon>1$ и $\mu>1$ приводит к снижению влияния внешних полей вследствие увеличения «угла встречи» с апертурой антенн: $\alpha_2>\alpha_1$ (рис. 6.1.21) и уменьшения расстояний, на которых побочную связь между антеннами из-за переотражений от находящихся вблизи антенн посторонних предметов можно считать существенной (на рис. 6.1.21 $h_2>h_1$).

Стремление получить бо́льшую развязку между антеннами заставляет увеличивать затухание в РПМ, а стремление снизить влияние побочных переотражений заставляет это делать, увеличивая не толщину материала Δ, а его удельное по глубине затухание. Последнее не может не привести к изменению условий согласования антенны с рабочей средой. Хотя эти изменения фактически постоянны и не изменяются при смене образцовой антенны на поверяемую, в некоторых случаях (например, из-за рассогласования антенн с генератором или приемником) эти изменения оказываются нежелательными. В этом случае применяется РПМ с изменяющимися по толщине параметрами затухания таким образом, что в плоскостях раскрывов обеих антенн свойства материала близки к свойствам рабочего пространства антенн, а в центре значения параметров, характеризующих затухание, максимальны.

6.1.8. Краткий обзор методов визуализации радиополей. В последние годы появилось большое количество сообщений патентного и исследовательского характера о разработке ряда способов визуализации радиополей и их реализаций в конкретных технических проектах, которые позволяют использовать их для решения задачи поиска мест просачивания СВЧ энергии через электромагнитные неплотности в конструкциях шкафов генераторов и фидеров, для изучения распределения поля в фантомах, применяемых для биофизических исследований, и некоторых других целях. Предложенные до сих пор способы визуализации позволяют говорить о получении не столько количественных, сколько качественных характеристик поля, и они могут быть отнесены к интенсиметрии только условно.

Используемые для целей визуализации радиополей способы и устройства (см., например, [42, 65, 69, 105, 108, 116, 119а, 137, 148, 157]) как правило, весьма теплочувствительны, требуют дополнительной последующей обработки материалов или имеют другие существенные недостатки и поэтому не могут служить целям экспресс-визуализации, т. е. наблюдению распределения энергии поля непосредственно во время опытов. Кроме того, эти методы весьма грубы: для их реализации требуются весьма высокие плотности мощности (0,1...10 Вт/см² непрерывной мощности); таким образом, для облучения, например, площади 0,1...1 м² требуются генераторы мощностью 10^3...10^5 Вт; как известно, получение таких мощностей весьма сложно.

Перспективным для экспресс-визуализации радиополей является метод использования распределенных в пространстве или плоскости микрообъемов инертного газа, помещенных в светорадионепрозрачную оболочку. При увеличении электрической составляющей облучающего поля до определенного порога газ начинает светиться. Зависимость яркости свечения инертного газа от напряженности поля носит ступенчатый характер, поэтому для получения необходимого динамического диапазона работы устройства облучение должно производиться с огибающей, близкой по форме к треугольной. Тогда микрообъемы газа, находящиеся в области с высокой интенсивностью, будут гореть значительно дольше тех, что находятся в «тени»,

а это из-за инерционности глаза и фотографической аппаратуры (при съемках картины поля) дает эффект изменения яркости свечения. При облучении «ковра» с микроэлементами инертного газа поляризованным с модуляцией прямоугольными импульсами фиксируемый динамический диапазон весьма невелик, и этот метод можно использовать только для простейших случаев, например, для обнаружения утечек в аппаратуре. Средние мощности генератора на 2...4 порядка ниже используемых при других способах визуализации и легко могут быть получены в лабораторных условиях.

Методы визуализации могут быть использованы для обнаружения утечек СВЧ энергии, создающих потенциальную опасность переоблучения личного состава, и исследования распределения поля внутри биообъектов при экспериментальном облучении (см. также «Методы неразрушающих испытаний». М., «Мир», 1972, с. 447).

6.2. ПРАКТИКА ИНТЕНСИМЕТРИИ ПОЛЕЙ

В зоне действия мощных РТС группа контроля облучаемости выполняет ряд задач по подготовке, обеспечению и проведению измерений.

Существенная доля всего времени, отведенного на выполнение комплекса измерительных работ *внешнего (антенного) поля* радиотехнических средств, выделяется на работы, связанные с выбором точек измерения, расстановкой опознавательных знаков на трассе, подготовкой средств связи, плана управления устройствами перемещения антенны, обеспечения безопасности операторов, работающих с измерительной аппаратурой. После подготовки и согласования с персоналом излучающей станции планов проводятся сами измерения. Как показывает опыт, вносить в процессе измерений изменения в разработанный план крайне нежелательно, и на это надо идти в самых крайних случаях. Такие изменения обычно влекут за собой резкое удлинение сроков измерений, часто сопровождаются грубыми промахами при количественном описании результатов измерений. После обычной обработки результаты измерений используются для оценки опасности отдельных точек либо всей территории. Для дальнейшего использования результатов измерений бывает удобно строить границы нормированных зон — линий на местности, на которых ППМ равна 10, 100, 1 000 мкВт/см^2. Результаты измерений, проведенных с необходимой тщательностью, могут быть использованы для коррекции ВДИ.

Измерение *внутренних полей* требует известных навыков. В особенности это относится к измерению полей

в длинноволновом участке СВЧ диапазона. К трудным следует отнести условия измерения на борту кораблей и особенно летательных аппаратов (вертолетов, самолетов), снятие разреза поля с помощью измерителей, установленных на шарах-зондах, и т. п. На некоторых из этих случаев мы коротко остановимся.

6.2.1. Выбор мест измерения на местности и подготовка к работе. Измерение полей на местности можно отнести к разряду обычных работ, однако законченного свода правил пока нет.

Выбор места измерения обусловливается характером предстоящей работы (определение опасности в отдельных точках, общая гигиеническая характеристика местность, общая характеристика радиополя и т. п.), рельефом в зоне станции и техническими возможностями.

К наиболее простым задачам можно отнести определение потенциальной опасности в отдельных точках: в местах возможного скопления людей, в обращенных к антеннам станций оконных проемах жилых зданий и т. п. Измерения проводят на верхнем, одном-двух средних, нижнем этажах здания и обязательно на земле на уровне человеческого роста. Однако по горизонтали, если территория облучается станциями с вращающимися антеннами, выбор мест можно ограничить только точками, находящимися на существенно различных расстояниях от антенны передатчика или в радиотени различной плотности (разная густота деревьев перед домом и т. п.). Обычно измерения проводятся только при прямой видимости антенны, но при очень высоких возможных ППМ и при отсутствии прямой видимости. Для излучателей, работающих на нижнем участке СВЧ диапазона, причиной повышения уровня плотности мощности в области тени может явиться дифракция, величину которой $B_{\text{диф}}$ можно подсчитать по графикам, приведенным на рис. 5.2.7.

При измерении интенсивности поля по радиальной трассе выбор определяется следующими требованиями:

— трасса не должна иметь значительной вертикальной неравномерности; средний наклон ее должен быть не ниже среднего наклона местности в наиболее ответственных направлениях;

— трасса должна быть открытой, т. е. с любой точки трассы должна быть прямая видимость антенны станции; желательно, чтобы на трассе отсутствовали боль-

шие металлические сооружения (мачты высоковольтных передач и т. п.), искажающие общую картину поля;

— в выбранном угловом направлении должно достаточно просто обеспечиваться управление антенными приводами;

— трасса должна быть проходима для транспорта, если в процессе измерений используются автосредства.

Выбор расстояния до точек измерения на трассе производится по закону, близкому к логарифмическому (например, 50, 100, 200, 500, 1 000 м и т. д.).

Следует рекомендовать выбор направления прохода трассы *от станции*: это позволит избежать различных недоразумений, неизбежных при измерении вдали от точки излучения при малом уровне сигнала (тем более в отсутствие прямой связи пункт приема — передатчик). При работе на трассе измерения обычно проводятся на одной (1,6 ... 2 м) или двух (1,6 и 3 м) высотах относительно земли.

Снятие вертикального разреза поля — наиболее трудоемкий вид измерительных работ на местности. Измерения проводят на трассе, которая должна удовлетворять обычным требованиям (см. выше), но в каждой точке трассы измерения проводятся на четырех-восьми высотах до 15 ... 20 м относительно уровня земли. Последнее заставляет предъявлять особые требования к трассе в отношении проходимости для больших автомашин с подъемниками; значительно увеличивается время измерений, но зато на основании таких измерений оказывается возможным прогнозировать облучаемость высотных объектов, находящихся еще в стадии строительства, а также определять, хотя бы приближенно, эффект от качания луча или изменения высоты антенны.

Разработка системы связи — ответственный момент в подготовке к измерениям. Чаще всего прибегают к радио-, телефонной связи или визуальной сигнализации с помощью сигнальных флажков. Как показывает опыт, всегда удобнее применять радиосвязь, тем более, если измерения проводятся на автомашинах. В некоторых случаях, особенно если для измерений применяется малоинерционная аппаратура и если в процессе измерений режим излучений не меняется, можно обойтись без специальных средств связи. Например, измерительные работы в зоне действия РЛС кругового обзора с постоян-

ным углом наклона антенны могут быть проведены вообще в режиме нормальной работы, и подготовка станции к измерениям будет заключаться только в том, чтобы было выполнено единственное требование — не выключать передатчик и не изменять его мощности до конца измерений.

К подготовительному этапу относится также проверка измерительной аппаратуры, проводимая в соответствии с инструкцией по эксплуатации, а также расчет степени биологической опасности для лиц, проводящих измерения (при этом можно рассчитывать поле или применять готовые ВДИ). Считая, что воздействие поля на операторов носит прерывистый характер и не превосходит двух часов в сутки, можно допустить работу без защитной одежды при ППМ не более 1 000 мкВт/см². При превышении этого уровня следует пользоваться защитной одеждой, уменьшать в несколько раз выходную мощность передатчика или в крайнем случае работать на углах наклона антенны несколько выше рабочих.

6.2.2. Измерения в поле антенны. Начало измерений целесообразно планировать на время, наиболее свободное от специальных работ на станции. Если передающая аппаратура может работать в режиме периодического сканирования или вращения, то при использовании малоинерционных измерителей направление излучающей антенны на точку измерения (обычно только в горизонтальной плоскости) может быть выбрано весьма приблизительно *.

При работе с инерционной аппаратурой (например, приборы ПО-1) обычный режим сканирования или вращения исключается. Во время работы антенна направляется на точку измерения и в течение всего процесса измерения остается неподвижной или покачивается в секторе относительно выбранного направления. При медленном сканировании фиксируется наибольшая ППМ. Работа с ПО-1 при работе в таком режиме излучателя несколько затруднена тем, что в соответствии с принципом работы измерителя мощности компенсацию разба-

---

* Влияние земли приводит к появлению значительного эксцентриситета эллипса поляризации у земли при падении даже волны с поляризацией, близкой к круговой. Например, при отражении от земли, поросшей травой, эксцентриситет доходит до 2000 [191], поэтому поляризационный поиск даже для станций с круговой поляризацией всегда обязателен.

ланса моста следует проводить при поддержании неизменным направления излучения в течение по крайней мере 3 ..., 5 с, т. е. фактически при остановленной антенне. Работа при остановленной антенне не дает уверенности в том, что фиксируется максимум поля, поэтому во всех случаях режим периодического покачивания более предпочтителен. При этом рекомендуется пользоваться следующим приемом: при медленном покачивании антенны передатчика следует отметить наибольший разбаланс по индикатору нуля, а затем, закрыв приемную антенну (или отсоединив ее, а иногда просто положив на землю и направив от станции), ручкой установки нуля выставить такой же разбаланс искусственно и в дальнейшем произвести обычные операции для компенсации разбаланса и отсчета мощности.

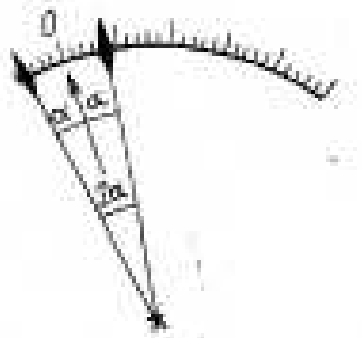


Рис. 6.2.1. Определение баланса по биссектрисе угла качания стрелки нуль-индикатора измерителя мощности прибора ПО-1 (сектор качания 2α).

Следует отметить, что при фиксации баланса по биссектрисе угла качания стрелки нуль-индикатор (рис. 6.2.1) прибором ПО-1 можно проводить измерения средней плотности мощности излучения сканирующих антенн, даже если частота сканирования значительно ниже гарантируемых 50 Гц — вплоть до 1 ... 2 Гц. Как показал эксперимент, при длительностях импульсов до 0,5 мс дополнительная ошибка измерения при этом не превышает ±1 дБ. Перед измерениями ППМ медленно-периодических излучений импульсных РЛС необходимо проверить выполнение условия электрической прочности термистора, допускающего импульсную мощность 50 Вт:

$$П_{изм} S_{эфф} q \gamma 10^{-4} < 50, \qquad (6.2.1)$$

где $П_{изм}$ — предполагаемый уровень средней ППМ, мкВт/см²; $S_{эфф}$ — величина эффективной поверхности измерительной антенны, см²; q — скважность импульсов, генерируемых РЛС; γ — скважность сканирования.

Для работы на больших (обычно до 15 ... 20 м) высотах можно использовать подъемники, смонтированные на автомашинах. При этом поднимается либо оператор с прибором, либо только антенны прибора. Например,

если измерения проводятся прибором ПО-1, поднимать можно только антенну; при этом ее подключают к находящейся внизу термисторной головке через высокочастотный кабель (его затухание определяется заранее и учитывается при обработке результатов измерений). Если пределы изменения уровня поля по высоте относительно невелики, можно поднимать антенну и термисторную головку, соединенные непосредственно или через аттенюатор. В этом случае никакие дополнительные потери низкочастотного кабеля, естественно, не учитываются.

Для станций с эллиптической поляризацией и при значительном влиянии побочных отражений приходится осуществлять поляризационный поиск, вращая приемную антенну, измеряя интенсивность в максимуме и минимуме. Более удобно проводить измерения с помощью неполяризованных зондов, которые позволяют эффективно применять систему автоматической записи результатов измерений обычными самописцами, дополненными устройством записи меток высоты.

При измерении полей от станций, имеющих две или несколько одинаковых антенн, не следует полагаться на их идентичность (например, по данным измерений диаграммы в дальней зоне): нередко разница в уровнях ближнего поля таких антенн превосходит 5 или даже 10 дБ, т. е. измерения (так же, как и расчет) необходимо проводить индивидуально для каждой антенны.

6.2.3. Обработка результатов измерений внешних полей. После проведения измерительных работ иногда приходится прибегать к дополнительной обработке результатов измерений. Эта обработка заключается в следующем.

1. При существенном различии в результатах повторных измерений, проводимых в одних и тех же точках, если эти различия обусловлены несовпадением условий излучения и измерения (а не промахами — их удается диагностировать в процессе измерений и сейчас же перепроверять данные), необходимо сделать выборку максимальных значений ППМ и уже их использовать в дальнейшем для заключения о потенциальной опасности облучения полем в данной точке.

2. Приведение измеренных ППМ к номинальной мощности, если для обеспечения безопасности операторов группы контроля и посторонних лиц, снижения нагрузки

на передатчик и т. п. измерения проводились при сниженной в $K_р$ раз мощности излучения, заключается в простом умножении ППМ на $K_р$.

3. Иногда, опять-таки для обеспечения безопасности при измерениях и в некоторых особых случаях, приходится производить измерения при угле наклона электрической оси антенны, значительно большем рабочего угла. Иногда приходится использовать имеющиеся результаты измерений для оценки влияния изменения высоты антенны, например, при проектировании защиты методом подъема излучающей антенны на эстакаду. Во всех подобных случаях речь идет об изменении приведенного угла в δn раз. Приближенно оценить влияние этого из-

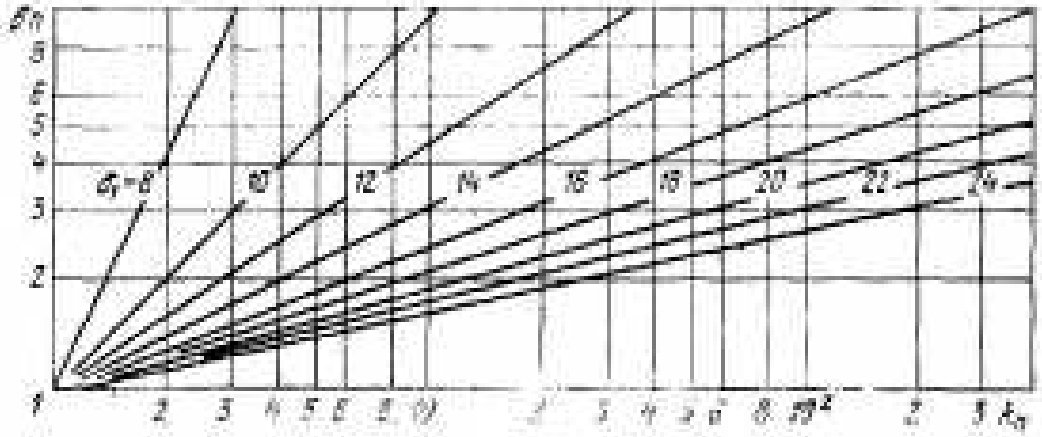


Рис. 6.2.2. График пересчета измеренных ППМ для изменения приведенного угла в δn раз.

менения углов и высот для апертурных антенн можно на основании аналитических выражений графиков для масштабной функции $M(n)$ (см. рис. 4.3.6) или по графику рис. 6.2.2., где изменения огибающей поля $k_п$ даны в виде функции аргумента δn для нескольких целых значений уровня первого бокового лепестка δ_1 в децибелах.

При использовании этих графиков следует на основании формулы (5.1.1) определить отношение δn приведенных углов — начального и измененного — и затем по графику определить значение $k_п$, соответствующее известному уровню первого бокового лепестка δ_1.

4. Пересчет единиц измерения встречается на практике крайне редко, например, при сравнении данных измерений ППМ в диапазоне 0.15 ... 0,3 ГГц, полученных измерителем ППМ (прибором ПО-1) с нормативами, установленными для этого диапазона в СССР в единицах напряженности электрического поля, или при оценке

потенциальной опасности облучения энергией СВЧ в реактивном поле на основании измерений напряженности одной из составляющих поля. Во всех этих случаях для пересчета можно пользоваться известными соотношениями

$$П = E^2 \cdot 10^6/377, \qquad (6.2.2а)$$

$$E = 1{,}94\sqrt{П}, \qquad (6.2.2б)$$

где $П$ [мкВт/см^2]; E [В/м] (эффективные значения).

6.2.4. Особенности условий облучаемости на борту корабля. К особенностям условий облучаемости в этом случае следует отнести очень высокую насыщенность радиоизлучателями и высокую степень влияния на формирование поля металлических предметов, имеющих очень широкий диапазон электрических размеров: от сотых долей до единиц и десятков длин волн.

Первая особенность осложняет не столько условия *измерений* (здесь, как и везде, считается обязательным во время измерительных работ включение на излучение только проверяемой антенны, остальные должны быть выключены), сколько *оценку* потенциальной опасности полей, уровни которых уже известны. Если считать обычной существенную нестабильность положения экипажа и пассажиров относительно излучающих антенн, то оказывается, что здесь наиболее целесообразно оценивать облучаемость методами дозиметрии (вкратце рассмотренными ниже, § 6.3).

Вторая особенность, влияние близкорасположенных металлических поверхностей с размерами элементов, меньших, равных и больших длины волны, приводит к количественным и качественным изменениям первичного поля [53]: к снижению контрастности картины пространственного распределения поля из-за исчезновения глубоких теней и к появлению значительной качественной неоднородности поля из-за реактивного характера поля осциллирующих (переизлучающих) элементов и установлении четко выраженных стоячих волн в пространстве.

Наконец, к особенностям обстановки на плавсредствах следует отнести возможность резкого повышения уровня поля во время качки (особенно килевой) от передающих антенн с автосопровождением. Поэтому заключение о потенциальной опасности на основании результатов измерений, проводимых от таких антенн во время спокойной погоды, не является полным. При невозможности провести измерения ППМ в условиях качки следует пользоваться либо расчетными методами, либо методами и средствами индивидуальной дозиметрии.

6.2.5. Определение облучаемости на борту летательных аппаратов. Летный состав самолетов и вертолетов может подвергаться радиовоздействию от полей наземных РЛС (наиболее опасные из них — с автосопровождением) и собственных передающих антенн [162]. Обычно применение специальных мер защиты позволяет до необходимого минимума уменьшить собственное радиополе, поэтому измерение его интенсивности достаточно проводить только на этапе наземных испытаний.

Внешнее поле в приаэродромной зоне и вблизи мощных радиолокационных станций отличается большим временным и спектральным разнообразием при плотностях, которые могут представить опасность для летчика. Поэтому вопросу безопасности приходится уделять здесь особое внимание. Из-за малого времени и высокой стоимости полетов для измерений полей в кабине летательного аппарата можно применять только малоинерционную интенсиметрическую аппаратуру, лучше всего — с прямым отсчетом. В общем случае, если число трасс заранее не ограничено или измерить ППМ от всех источников заранее невозможно, целесообразно пользоваться средствами дозиметрии или полагаться на результаты расчета (см. § 5.1).

6.2.6. Специфика измерений внутренних полей. На точность измерения внутренних полей влияют прежде всего:

— размер приемной антенны вследствие высокой пространственной неоднородности распределения падающего поля по апертуре антенны вблизи радиоотражающих поверхностей (происходит как бы пространственное усреднение уровня);

— несовпадение структур того поля, для измерения которого предназначена антенна, и реактивного поля излучающих щелей и переизлучающих вибраторов как на малом от них расстоянии (расстояния значительно меньше длины волны), так и на сравнительно больших расстояниях в поле стоячей волны, образующемся в замкнутом пространстве.

Известно, что при сферической волне допустимое расстояние от излучателя для зонда размером L будет $2L^2/\lambda$, на меньших расстояниях фазовая неоднородность будет больше, чем $\lambda/8$, что приведет к значительным ошибкам измерения. Таким образом, для обычных одноволновых или полуволновых антенн-зондов минимально допустимое расстояние не превышает $\lambda \ldots \lambda/2$. На меньших расстояниях использовать для оценки биологической опасности результаты измерений плотности падающей мощности обычными антеннами недопустимо вследствие появления признаков реактивного поля вблизи осциллирующих щелей (см. также п. 1.2.2, § 3.1 и 6.1).

Выше (§ 3.1) мы рассмотрели электромагнитную структуру поля электрически малых вибраторов. Предположим, что эта структура некоторым образом соответствует картине поля вблизи единичных отверстий (неплотностей) в экранах шкафов, внутри которых находятся источники электромагнитной энергии, падающей на экран с отверстиями. Если бы задача определения

момента диполя в выражении (3.1.8) была практически решаема, можно было бы определить величину дифрагировавшего на отверстии поля прямым путем на основании полученного нами выражения для $\Pi_{ср}$. Между тем, ни измерить, ни рассчитать эту величину на практике

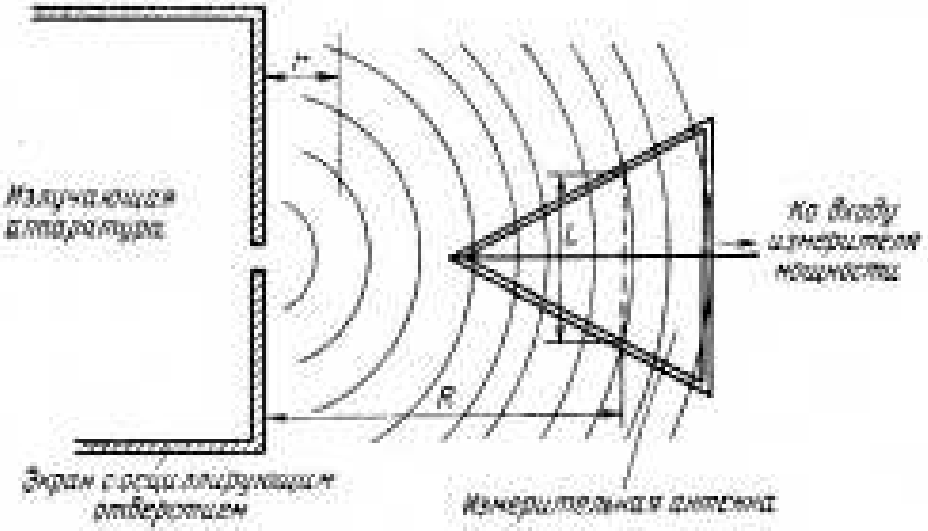


Рис. 6.2.3. К расчету биологической опасности вблизи шкафов с мощной СВЧ аппаратурой:

r — расстояние, на котором следует оценить потенциальную опасность; R — расстояние, разрешенное для измерения данной антенной с активным вибратором $L=\lambda/2$.

не удается, и поэтому пока можно рекомендовать пользоваться после соответствующего пересчета результатами измерений плотности падающей мощности, проведенными на расстояниях далее $(0{,}5\ldots1)\lambda$. Как сделать этот пересчет?

Считая щель точечным источником излучения (в большинстве практических случаев это вполне допустимо), пересчет ППМ из значений, определенных на расстоянии R, в значения ППМ на расстоянии r (рис. 6.2.3) можно вести по квадрату расстояний. С расстояний $\lambda/2\pi$ и ближе учет реактивного характера поля можно проводить с помощью так называемого «коэффициента реактивности» (см. § 3.1), полученного после несложных преобразований выражения (3.1.8). Окончательное выражение для расчета уровня поля Π_r на расстоянии r при измерении поля антенной, активный вибратор которой на данной частоте находится на расстоянии R от

источника геометрически малых размеров (рис. 6.2.3), записывается так:

$$П_r = П_R \left(\frac{R}{r}\right)^n \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r}\right)^2}, \qquad (6.2.3)$$

где $П_R$ — измеренный уровень поля, $n=2$ для точечного источника, $n=1$ для щели.

6.3. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАДИОБЕЗОПАСНОСТИ. ДОЗИМЕТРИЯ СВЧ *

Традиционные методы одноразового или периодического контроля облучаемости с помощью интенсиметров неудобны по двум причинам. Во-первых, неавтоматические интенсиметры требуют специального выделения времени и группы людей, способных произвести необходимый минимум измерений и правильно их обработать. Во-вторых, даже при самом удачном выборе методики измерения и обработки полученных данных результатов обследования приходится надеяться на типичность условий измерений по крайней мере в статистическом плане; иначе говоря, при существенном разнообразии радиационной обстановки результатам периодического и тем более разового контроля приходится доверять с особыми оговорками. Наконец, интенсиметрия не позволяет персонализировать данные контроля облучаемости. Данные об условиях облучения рабочего места могут служить только характеристикой этого рабочего места, но никак не характеристикой облучаемости работающих. Если даже исключить требование интегральной оценки облучаемости всего тела, здесь не учитывается по крайней мере два необходимых параметра: время пребывания под излучением и реальный уровень воздействующего поля. Обычно же во время контрольных проверок, особенно неквалифицированным персоналом, фиксируется уровень поля при таких невероятных, наверняка неправильных положениях антенны измерителя, что данные измерений можно считать завышенными во много раз.

---

* В разработке ряда вопросов дозиметрии принимали также участие Н. И. Бабкин, Г. Я. Вершков, А. М. Гуревич, Е. А. Лепорская, А. Г. Неделяев, Л. В. Толстой.

Цель введения автоматического контроля — снижение трудоемкости измерений, объективизация и персонализация оценки биологической опасности. По порядку возрастания трудности технической реализации и приблизительно по степени возрастания объема и ценности получаемой информации приборы автоматического контроля можно перечислить в таком порядке:

Индикаторы (сигнализаторы) превышения заданного уровня ППМ. Выполняются в индивидуальном (носимом) и коллективном (стационарном) вариантах. Такие приборы уже давно применяются в лабораториях П. Л. Капицы (Ин-т физических проблем АН СССР) [22].

Дозиметры радиоколебаний, осуществляющие индивидуальный или коллективный контроль облучаемости с учетом времени воздействия. В необходимых случаях такие дозиметры могут иметь выводы для сигнализации о степени опасности (по накопленной дозе или по уровню). Дозиметры применяются как у нас, так и за рубежом [22, 101, 190]. Зачастую они выполняются с малым временем усреднения без устройств накопления результатов. Такие приборы принято называть измерителями мощности дозы.

Интенсиметры-самописцы для непрерывной записи уровня ППМ во времени. Основная задача применения таких приборов — автоматизация измерений ППМ и, кроме того, получение данных для вероятностной оценки временных характеристик облучаемости местности. Интенсиметры-самописцы принципиально мало отличаются от обычных интенсиметров с прямым отсчетом и поэтому здесь не рассматриваются.

Общим для автоматических контрольных приборов является требование высокой общей (амплитудно-поляризационной) изотропности * приемного зонда. Известно [180], что для поперечных волн даже только пространственно-изотропную антенну получить нельзя, поэтому для увеличения изотропности в стационарных устройствах применяются различные технические приемы (например, периодическое сканирование антенн-зондов) либо используется предварительная информация о преимущественном направлении прихода волны и ее поляризации. В индивидуальных дозиметрах, использующих простейшие антенны типа одиночных вибраторов,

* См. сноску на стр. 258.

достаточно высокая пространственно-поляризационная изотропность реализуется в статистическом понимании, в расчете на существенную неопределенность перемещений антенны приемника вместе с корпусом человека. Для условий, когда место оператора относительно постоянно, дозу легко рассчитать на основании падающей ППМ и среднего времени облучения, и поэтому использовать дозиметры нецелесообразно. Кстати, антенны типа одиночных вибраторов имеют диаграммы с очень узкими минимумами, поэтому возможность искажения результатов индивидуальной дозиметрии даже для неподвижного человека можно не принимать во внимание.

6.3.1. Существующие индикаторы поля. Функциональная схема индикаторов [22, 166] такова: антенна — (аттенюатор) — детектор — (усилитель) — амплитудный дискриминатор + расширитель импульсов — генератор сигнала опасности — звуковой сигнализатор. Порог опасности устанавливается изменением затухания СВЧ аттенюатора или порога срабатывания амплитудного дискриминатора. Для получения многопороговой индикации применяют набор амплитудных дискриминаторов, переключающих либо амплитуду выходного сигнала, либо его частоту.

Практические схемы обычных индикаторов-сигнализаторов относительно просты. Основное внимание при их разработке приходится уделять экономичности устройства в ждущем режиме. Необходимость формировать и излучать достаточно мощный сигнал опасности не позволяет выполнить их совсем без источника питания, но ток в холостом режиме удается снизить до пренебрежимо малых величин.

Детекторные схемы индикаторов являются сейчас основными для фиксации относительно небольших уровней непрерывных колебаний. Для работы в импульсных полях высокой пиковой интенсивности (выше 60 ... 320 мВт/см²) используются газонаполненные лампы [89]. Работа таких датчиков возможна в диапазоне 50 ... 3 000 МГц (см. табл. 6.1.2).

Вследствие возможного психологического влияния на персонал считается целесообразным применять приборы с немедленной сигнализацией опасности только в особо доказанных случаях, когда возможно воздействие уровней или доз, безусловно опасных и требующих немедленных мер защиты. В соответствии с современными

нормативами безусловно опасным уровнем следует считать величину 1 ... 10 мВт/см² или даже более [85, 119а]. Применение системы сигнализации о кратковременном облучении полями меньших плотностей следует считать нецелесообразным.

Одна из практически применяемых схем однопорогового индикатора-сигнализатора [22] включает в себя антенну в виде элементарной рамки, диод-детектор (ДК-В4), одноканальный усилитель постоянного тока, одновибратор и заторможенный генератор низкой частоты, нагруженный на звуковой излучатель ДЭМ-4. При достижении заданного уровня облучающего поля система выдает громкий звуковой сигнал на частоте 800...1000 Гц. Схема собрана в небольшом корпусе, питается от батарей типа КБС и ФБС. Вследствие того, что в режиме ожидания потребляемый ток оказывается одного порядка с током саморазряда батарей, выключатель питания в приборе не предусмотрен. Прибор предназначен для работы в комнатных условиях.

Дополнение индикаторов уровня счетчиками времени (по каждому уровню отдельно) позволяет получить простейшие устройства, фиксирующие время воздействия поля. Однако практического распространения такие индикаторы-дозиметры не получили; достаточно сложные схемно, обязательно с источниками питания, эти приборы, между тем, грубы и неточны; несмотря на кажущуюся простоту формы результатов измерения, объективная оценка опасности с помощью таких приборов практически невозможна. Поэтому в настоящее время для учета временных характеристик воздействия используются дозиметры, показания которых пропорциональны интегралу плотности потока мощности по времени.

6.3.2. Дозиметры радиоизлучений. Дозиметры радиоизлучений в зависимости от принципа отсчета дозы можно разделить на два типа в соответствии с принципами нормирования, принятыми в обеих странах, разрабатывающих дозиметры: в СССР и США. В дозиметрах обоего типа фиксируется величина накопленной дозы за некоторое время. В СССР величина этого времени ненормирована, и все отечественные дозиметры строятся по типу накопителей за более или менее продолжительное время. В США величина $T_н$ строго нормирована. До недавнего времени отдельными ведомствами США она была установлена равной 30 с [101]. С введением в 1966 г. единого стандарта США (USAS C.95.1—1966 [85]) она была увеличена до 6 мин. Таким образом, при сокращении времени воздействия $T_в$ от $T_н$=6 мин и менее допустимая ППМ $П_{доп}$ возрастает от $П_н$=1 ... 10 до 80 мВт/см² и более при времени разового (за каждые 6 мин) воздействия доли минут и менее. Схемы дозиметра, построенные по этому типу, берут пробы ППМ за выбранное время усреднения и перио-

дически сравнивают ее с нормативной величиной:

$$\frac{1}{T_н}\int_0^{T_н} П(t)\,dt \gtrless M_э^{(T_н)} = \frac{Д_н}{T_н}.$$

Левая часть неравенства — это фактически выражение для мощности дозы, поэтому приборы, работающие по такому принципу, правильнее называть измерителями мощности дозы. Эти приборы уже построены и используются, в частности, в США, но непригодны для использования в соответствии с принятыми у нас нормативами. Действительно, измерители мощности дозы с регистрацией дискретных доз, или *дискрет-дозиметры*, имеют кратковременную память, соответствующую установленным $Д_н$ и $T_н$ (обычно $Д_н$=0,3 Дж/см² при $T_н \approx 10^2 \ldots 10^3$ с и поэтому не могут дать представление об облучаемости человека в течение сколько-нибудь длительного времени. Эту функцию могут выполнить дозиметры второго типа, фиксирующие плотность падающей дозы в реальном времени, т. е. определяющие величину, пропорциональную $\int_0^T П(t)dt$, где T — время измерения. В зависимости от назначения, память таких реал-дозиметров может составлять от нескольких единиц до сотен джоулей на квадратный сантиметр при времени непрерывной регистрации единицы и сотни суток.

Общим в конструкциях дозиметров и измерителей мощности дозы является наличие элементов памяти интеграла уровня по времени. Элементы памяти реализуются, в основном, двумя способами: с помощью интегрирования тепла, выделяемого при абсорбции электромагнитной энергии телами с высокой тепловой инерцией (антенные и безантенные варианты) или с помощью интегрирования тока детектора (термистора, термопары, кристаллического диода и т. п.), включенного на выходе антенны-зонда. Достоинством приборов, выполненных первым способом, является возможность обойтись без детектора и даже без антенны, однако безантенные варианты дозиметров имеют очень низкую чувствительность и подвержены влиянию внешних тепловых помех. Действительно, в среднем тепловые потоки от тела «стандартного» человека в спокойном состоянии и дополнительный поток энергии при облучении его средней плотно-

стью мощности порядка 10 мВт/см² считается равным соответственно 77 ... 89 и 57,5 Вт, а тепловой поток от человека, выполняющего умеренную работу — 293 Вт*, поэтому выполнить безантенные дозиметры для индивидуального пользования не удается (даже при лучшем решении вопроса нейтрализации антенного эффекта устройств ввода температурных датчиков). Насколько можно судить по данным, имеющимся в доступной литературе, испытания первого безантенного бездетекторного индивидуального измерителя мощности дозы — «дозиметра Ричардсона» — не оказались успешными [190].

Практические конструкции антенных бездетекторных дозиметров пока не созданы. Для получения более высокой (по сравнению с безантенными вариантами) чувствительности и помехозащищенности эти дозиметры требуют применения высокоэффективных и, следовательно, высоконаправленных антенн, а поэтому тоже могут быть реализованы только в виде стационарных конструкций, предназначенных для регистрации излучений с одного заранее известного направления.

Все известные к настоящему времени реал-дозиметры в носимом или стационарном исполнении сделаны в виде антенно-детекторных устройств. Динамический диапазон диодных детекторов (тем более по пиковым уровням) намного шире, чем, например, термопар или термисторов, однако это достоинство, как известно, реализуется только при использовании высокочувствительного усилителя. Возможность и необходимость работы при относительно высоком входном сигнале благоприятствует применению в диодных детекторных дозиметрах малочувствительных, но зато широкополосных антенн-зондов вместе с согласующими аттенюаторами, сглаживающими частотные характеристики зондов.

6.3.3. Элементы памяти реал-дозиметров. Детекторные антенные и безантенные дозиметры используют внешние элементы памяти, выполняемые на отдельных элементах: химических или механических интеграторах.

---

* В одной из известных работ Мамфорда [85] определение стандартного человека дано так: площадь поверхности его тела равна 1,858 м² (такова поверхность тела мужчины ростом 1,73 м и весом 69,85 кг) с температурой кожного покрова 35 °С. Эквивалентная поверхность тела, через которую осуществляется теплообмен путем конвекции и испарения, составляет 1,81 м² и, кроме того, 1,44 м² для теплообмена, обусловленного всенаправленным излучением.

Механические интеграторы (накопители) выполняются обычно как электромагнитные счетчики импульсов с декадными дисками. К основным достоинствам механических счетчиков относят цифровой вывод и высокую точность счета: при объеме памяти $10^4...10^5$ единиц дискретность счета составляет одну единицу. Однако для биологической защиты высокая абсолютная точность не имеет значения, поэтому из-за иных недостатков механических счетчиков (сложности и неэкономичности схемы управления, больших габаритов и массы чувствительности к механическим воздействиям и малой надежности) в новых разработках они, как правило, не применяются.

Рассмотрим несколько типов химических интеграторов, пригодных для работы в дозиметрах СВЧ.

Электрохимические (химотронные) интеграторы (кулометры) [76], основанные на изменении концентрации вещества в определенном объеме в зависимости от протекающего через него количества электричества, называются диффузионными и выполняются обычно в виде двух-, трех- или четырехэлектродных систем, помещенных в электролит (например, типа йод-йодид: раствор кристаллического йода в йодиде калия KJ).

В двухэлектродных интеграторах отсчет показаний производится наблюдением за цветом раствора или измерением возникающего между электродами так называемого концентрационного напряжения, которое находится в определенной функциональной зависимости от интеграла протекавшего тока по времени. Величина этого напряжения находится в пределах —10...+80 мВ; его можно измерить после окончания цикла работы внешними милливольтметрами.

Интеграторы-триоды позволяют вести непрерывное считывание интеграла измерением сопротивления электролита в анодкамере, однако они обладают относительно небольшой памятью и для «улучшения» памяти применяют четвертый (экранный) электрод. Недостатком тетродов, особенно заметных в схемах, предназначенных для работы в течение длительного времени, является необходимость в источнике питания как в режиме считывания, так и в режиме записи. Во многих случаях наличие на входе концентрационного напряжения является недостатком прибора.

Интеграторы дискретного действия предназначены для регистрации определенного количества электричества, прошедшего через прибор. Такие интеграторы выполняются в виде герметичной заполненной электролитом (обычно раствором хлористого натрия) стеклянной ампулы с двумя или тремя электродами, на один из которых нанесено определенное количество вещества. После переноса всего количества этого вещества резко изменяется падение напряжения на электродах; это изменение напряжения и используется для отсчета заданного количества заряда.

Интегрируемые токи таких интеграторов (с использованием в качестве активного вещества хлористого серебра) составляют 0,01 ... 1000 мкА, в импульсном режиме до 1 А. Для одного типа интеграторов отношение максимальных и минимальных рабочих токов находится в пределах 20 и более.

Мемисторы — химотронные интеграторы, основанные на изменении сопротивления проводника в результате осаждения на него металла или анодного растворения. В одном из типов мемисторов используется осаждение меди из раствора медного электролита на пленку или проводник из металла с высоким удельным сопротив-

лением. Для измерения сопротивления провода или пленки при считывании применяются мосты переменного тока.

Мемисторы отличаются очень высокой памятью (потери порядка 0,02% в сутки), высокими входными токами (в пределах нескольких миллиампер) при входной мощности по цепи входа порядка 1 мВт. Обычные пределы изменения сопротивления — от единиц до десятков и сотен ом. Мемисторы по сравнению с интеграторами диффузионного типа весьма температуростабильны и устойчивы к ударным нагрузкам и вибрациям. Основной режим работы мемисторов — счет импульсов постоянной амплитуды; известно также применение мемисторов для высокочастотной модуляции и в качестве управляемых сопротивлений.

Ртутные капиллярные кулометры (РКК), или ртутные счетчики времени, весьма интересны с точки зрения применения в СВЧ радиометрах. РКК состоит из стеклянного заполненного ртутью капилляра. Между столбиками ртути находится капля электролита, содержащего одновалентные или двухвалентные ионы ртути. При протекании через систему ртуть — электролит — ртуть тока столбик ртути с положительной полярностью будет уменьшаться в результате анодного растворения, а столбик ртути с отрицательной полярностью увеличиваться в результате осаждения на нем ртути. Для отсчета длины перемещения электролита на капилляре нанесены риски. Если необходима регистрация определенных количеств электричества, в капилляр впаиваются электроды, позволяющие осуществлять дискретный электрический съем показаний.

РКК нормально работают в режиме интегрирования тока не более 100...300 мкА, при особо чистых растворах — до 5 мА. Их сопротивление зависит от температуры (отрицательный температурный коэффициент около 2 Ом/°С), силы тока (см. ниже) и даже положения относительно вертикали, поэтому для работы в обычных схемах линейного интегрирования тока последовательно с РКК должен быть включен резистор с большим сопротивлением. Чувствительность РКК с одновалентной ртутью составляет около 70 000 мм/А·ч при капилляре диаметром 0,1 мм и уменьшается пропорционально квадрату диаметра. С двухвалентной ртутью чувствительность РКК снижена вдвое. Погрешность работы РКК — единицы процентов; этой же величины не превышает дискретность визуального отсчета.

Водородные кулометры основаны на использовании выделения или поглощения газа в результате электролиза. В водородных кулометрах используется выделение водорода в результате электролиза водных растворов щелочи или кислоты. Водородный кулометр состоит из встроенной в замкнутую стеклянную трубку системы платиновых электродов, между которыми находится фильтр, пропитанный раствором серной кислоты. При прохождении между электродами тока на катоде будет выделяться водород; на аноде водород с такой же скоростью будет поглощаться. Появившаяся разность давлений фиксируется по перемещению столбика жидкости, помещенного в капилляр. К числу важных достоинств газовых кулометров относится очень малое входное сопротивление (единицы ом) и его независимость от температуры и силы тока.

Следует отметить, что все химотронные интеграторы являются реверсивными счетчиками, т. е. при изменении направления тока изменяется и направление отсчета интеграла.

6.3.4. Применяемые конструкции дозиметров СВЧ. Описаний конструкций дозиметров СВЧ в литературе можно найти немного. Из дискрет-дозиметров известны фактически только два. Уже упоминавшийся нами дозиметр Ричардсона [190] выполнен на материале (желатине), близком по структуре к телу человека. Постоянная времени дозиметра — всего 6 мин, поэтому он принципиально не может быть использован для долговременного контроля. Основным недостатком прибора является очень высокая зависимость показаний от внешних тепловых помех. Например, при выносе прибора из комнаты наружу или прикосновении руки оператора изменения показаний оказываются во много раз большими, чем при облучении.

Дискрет-дозиметр, описанный в [101], — антенный детекторный прибор с кратковременной памятью на тетрод-солионе. Дискретность по времени — 30 с, номинальный средний уровень — 10 Мвт/см². Индикация световая и звуковая. Имеется три порога срабатывания по 30-с дозе, соответствующие трем степеням опасности при накоплении 0,3; 0,6 и 3 Дж/см². В прибор встроена система плавной индикации доз с использованием сложной электромеханической системы отслеживания на сериесном двигателе. Сложность схемы, громоздкость конструкции, низкую чувствительность (всего 0,1 мВт/см²), пространственную и поляризационную зависимость показаний (в общем крайне нежелательную для стационарного автоматического радиометра) следует отнести к явным недостаткам прибора.

Долговременные дозиметры, разрабатываемые в нашей стране последние 10—12 лет, являются антенными детекторными приборами. Начиная с 1962 г. в Институте физических проблем АН СССР дозиметрические методы используются для оценки облучаемости во время лабораторного эксперимента. Для этого в физической лаборатории института разработаны и построены два типа реал-дозиметров [22]: стационарный для работы в диапазоне уровней от 20 мкВт/см² до 200 мВт/см² с объемом памяти 10 Дж/см² и карманный, интегрирующий величину падающей плотности мощности от 0,1 до 10 мВт/см² с объемом памяти 100 Дж/см². Дозиметры предназначены для измерения непрерывной СВЧ мощности в диапазоне 0,3...3 ГГц, точность измерения дозы ±3 дБ.

В стационарном дозиметре для увеличения амплитудно-поляризационной изотропности * применяется периодическое сканирование антенны-зонда (магнитной рамки) с помощью моторчика и кривошипно-шатунного механизма. За основу усилителя постоянного тока положен фотокомпенсационный усилитель типа Ф17/1, нагруженный на микроамперметр (для наблюдения за величиной плотности облучающего поля) и предварительный накопитель тока на емкости. При каждом сбросе накопленного заряда отсчитывается одна единица, соответствующая 0,001 Дж/см². Для регистрации всей накопленной дозы служит механический счетчик.

Особенностью конструкции является наличие сигнализаторов по двум параметрам: плотности мощности — пороговый уровень 20 мкВт/см² и дозы — 8 Дж/см², а также наличие устройств отклю-

Рис. 6.3.1. Внешний вид карманного дозиметра радиоколебаний, разработанного в Институте физических проблем АН СССР.

чения облучающего генератора при превышении заданных пороговых значений плотности мощности (600 мкВт/см²) и дозы (9 Дж/см²).

В карманном дозиметре применена одна неподвижная антенна-зонд того же типа, что и в стационарном, и механический декадный счетчик. Схема выполнена полностью на транзисторах. Размеры и вес дозиметра позволяют носить его в нагрудном кармане. Для наблюдения результата сбоку в верхней части прибора расположено окно счетчика с четырьмя цифрами (рис 6.3.1).

Необходимость в источнике питания, ненадежность конструкции из-за наличия относительно сложной схемы и, главное, механического счетчика, большие габариты и масса не позволяют использовать оба типа дозиметров за пределами научно-исследовательских лабораторий. Поэтому в последнее время появился ряд конструкций долговременных дозиметров на химических интеграторах тока, обладающих существенными преимуществами перед приборами с механическими счетчиками. Использование в одном из таких дозиметров высокочувствитель-

* Амплитудно-поляризационная изотропность — произведение коэффициента изотропности диаграммы на коэффициент поляризации.

ного водородного интегратора значительно упростило схему прибора, которая состоит из трех основных элементов: антенный узел — выпрямитель (детектор) — интегратор. Антенный узел выполнен в виде двух элементарных рамок, плоскости поляризации которых сдвинуты одна относительно другой на 90°; сложение сигнала происходит уже после детектора. Таким образом, дози-

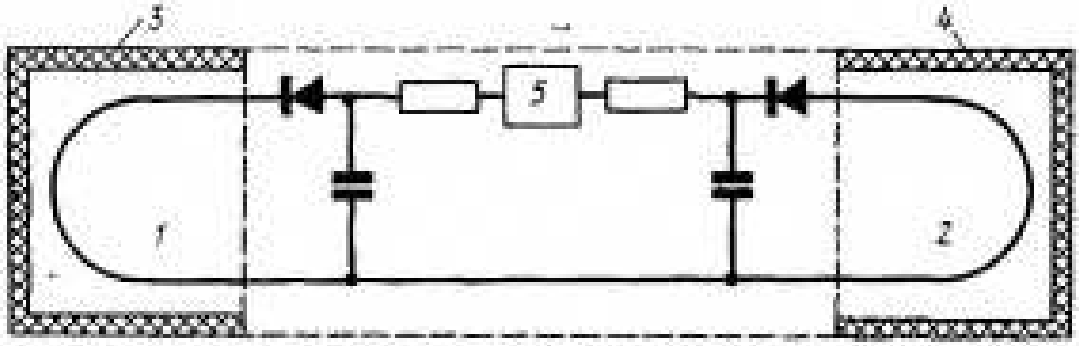


Рис. 6.3.2. Схема индивидуального дозиметра на водородном интеграторе.

метр (рис. 6.3.2) имеет две антенны *1*, *2*, закрытые полупроводящими чехлами *3* и *4*, выполняющими роль предварительных аттенюаторов. Антенны нагружены на детекторы, к выходам которых через *RC*-цепочки подключен электрохимический интегратор *5*. Калибровка дозиметра производится индивидуально для каждого прибора подбором величин ограничивающих сопротивлений.

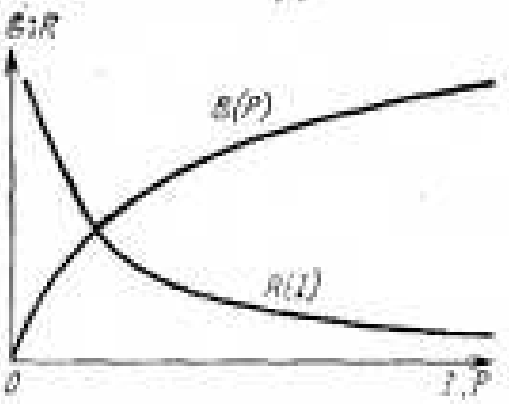


Рис. 6.3.3. Характер зависимостей э. д. с. $\mathcal{E}$ на выходе детектора от СВЧ мощности P и сопротивления кулонметра R от тока в цепи I.

Несмотря на ряд несомненных достоинств, дозиметры на водородных интеграторах в индивидуальном исполнении не применяются, так как они очень чувствительны к тряскам. Кроме того, из-за нелинейности характеристик диода детектора точность измерения дозы сильно зависит от динамического диапазона сигнала *.

* Вообще говоря, нелинейность интегрирования является только одним из нескольких недостатков конструкций дозиметров, разработанных к настоящему времени. В частности, пока приходится мириться с существующей амплитудно-поляризационной анизотропией диаграмм зондов, с необходимостью калибровки дозиметров раздельно для импульсных и непрерывных колебаний и т. д.

Для компенсации этих искажений предложено, например, в цепь интегратора включать варистор, характеристики которого подбираются в соответствии с использованным диодом.

По-иному решена задача компенсации нелинейности цепи детектор-интегратор в СВЧ дозиметре с РКК [27, 95]. Для этого используется обратный характер зависимостей: с одной стороны, сопротивления или напряжения от тока РКК, а с другой — тока от входной мощности полупроводникового диода (рис. 6.3.3).

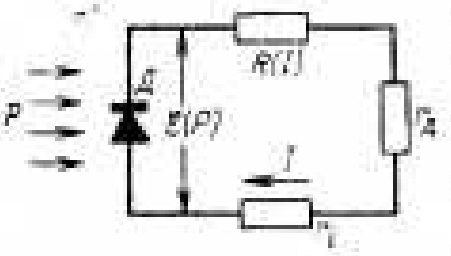


Рис. 6.3.4. К расчету компенсации нелинейностей кулометра и детектора.

Рассмотрим возможность взаимной компенсации нелинейностей диода и кулометра при их последовательном соединении. Ток I в цепи последовательно соединенных диода $Д$ (представленного в виде источника с э. д. с. $\mathcal{E}$, зависящей от входной мощности P и внутреннего сопротивления r_i), кулометра с внутренним сопротивлением $R(I)$ и добавочного сопротивления $r_д$ (рис. 6.3.4):

$$I = \mathcal{E}(P)/[R(I)+r_i+r_д]. \qquad (6.2.1)$$

Анализ экспериментально снятых характеристик кулометров показал, что, как правило, зависимость $R(I)=R(I)+(r_i+r_д)$ на определенном интервале токов можно аппроксимировать относительно простой функцией, удовлетворяющей уравнению

$$R(I)I^n = c, \qquad (6.3.2)$$

где n, c — некоторые положительные числа (см. ниже). Тогда уравнение (6.3.1) можно переписать так:

$$I = AP^k I^n/c, \qquad (6.3.3)$$

где $AP^k = \mathcal{E}(P)$; т. е. $AP^k = cI^{1-n}$; возможность аппроксимации $\mathcal{E}(P)$ в виде AP^k также определена экспериментально.

Можно показать, что при полной компенсации размах величины погрешности 2Δ для случая, когда отношение максимальной интегрируемой величины ППМ $П_{макс}$ к минимальной $П_{мин}$ равно 100 (обычное значение), будет выражаться формулой

$$2\Delta\,[\text{дБ}] = 20\left|1-\frac{k}{1-n}\right|. \qquad (6.3.4)$$

При калибровке приборов в точке

$$P_0 = \sqrt{P_{макс} P_{мин}} \qquad (6.3.5)$$

погрешность интегрирования (накопления) оказывается равной $\pm\Delta$.

Таким образом, при практически реализуемых $k = 0{,}6$; $n = 0{,}25 \ldots 0{,}35$ для $R_{мин} \gg (r_t + r_д)$ при компенсации $\Delta = \pm(0{,}7 \ldots 2)$ дБ, вместо ± 4 дБ без компенсации. При $c = 77$ $P_{мин} = 1{,}4 \cdot 10^{-4}$ Вт, $P_{макс} = 140 \cdot 10^{-6}$ Вт.

Очевидно, такие значения $P_{макс}$ и $P_{мин}$ для диапазона плотностей потока мощности $10^{-5} \ldots 10^{-3}$ Вт/см^2 легко получить с помощью элементарных зондов. При эффективной поверхности зонда $S_{эфф} = 10$ см^2 оказывается, что необходимая развязка между диодом и антенной должна быть в пределах 15 дБ, т. е. оказывается возможным довольно просто получить необходимое шунтирование выхода вибратора, уменьшить влияние тела человека и уменьшить частотную зависимость устройства от параметров диода, до минимума снизить опасность выгорания диода при электрических перегрузках. Расчетное значение «прочности на выгорание» диода при работе с генераторами непрерывных колебаний порядка 20 000, в импульсном поле со скважностью $10^2 \ldots 10^3$ он равен 2...20 при длительном воздействии и 20...200 при кратковременных перегрузках (все для диодов типа Д604). Увеличение полного объема памяти в 10 раз дает дополнительное увеличение запаса электрической прочности на порядок.

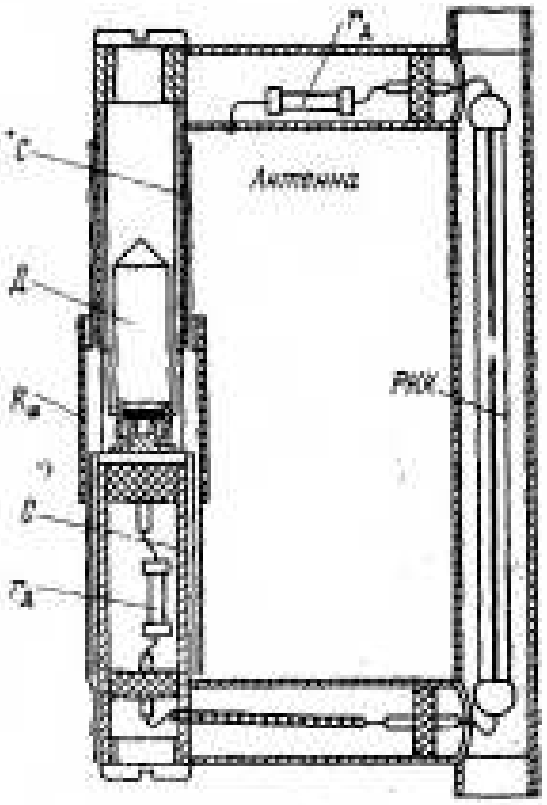


Рис. 6.3.5. Конструкция реал-дозиметра на РКК.

Конструкция дозиметра на РКК, представленная на рис. 6.3.5, включает в себя антенну-зонд, нагруженную

на высокочастотное шунтирующее сопротивление $R_ш$, и диод $Д$. Низкочастотная цепь диода-детектора состоит из дополнительных сопротивлений $r_д$ и РКК. В схему входит также конденсатор развязки C. Конструктивно дозиметр выполнен в виде прямоугольной одновитковой рамки с полыми вибраторами, внутри которой размещена вся схема дозиметра (рис. 6.3.5). Это позволило до минимума снизить влияние на характеристики прибора антенного эффекта элементов схемы и сохранить в «чистом» виде диаграмму зонда даже вблизи тела человека.

Основные данные дозиметра на РКК

Чувствительность	0,01 мм/мкВт·ч/см²
Объем памяти	4000 мкВт·ч/см² или 14,4 Дж/см²
Средняя ошибка интегрирования	0,12...0,19 дБ на каждый децибел отклонения от калибруемого уровня
Верхний предел по частоте	1 ГГц
Габариты	70×40×10 мм³
Масса	75 г

Внешний вид дозиметра показан на рис. 6.3.6.

В заключение параграфа о дозиметрии СВЧ следует подчеркнуть, что в некоторых наиболее простых случаях для реал- и дискрет-дозиметрии используются уже хорошо разработанные методы интенсиметрии. *Дозиметрия без дозиметров* может быть применена в экспериментах в лабораторных условиях при относительно стабильном поле, при оценке облучаемости на некоторых производствах, когда уровень поля и время воздействия поддаются относительно простому учету, и т. д. Во всех этих случаях используются основные соотношения между дозой, временем и уровнем поля, который в этом случае считается либо неизменным в течение всего опы-

Рис. 6.3.6. Внешний вид индивидуального реал-дозиметра.

та, либо изменяющимся дискретно. Естественно, неавтоматизированный подсчет дозы — процесс весьма трудоемкий и намного менее точный, чем с помощью дозиметрической аппаратуры.

Результаты оценки индивидуальной облучаемости при использовании дозиметров чаще всего оказываются намного ниже по сравнению с оценкой, полученной на основании данных интенсиметрии, которые обычно получаются при измерениях в таких местах, где человек бывает крайне редко либо вообще не бывает. Это не может не привести к предубежденности определенной части гигиенистов и особенно обследуемого персонала против широкого использования индивидуальных дозиметров, хотя в общем трудно не видеть, что дозиметрия как основа оценки облучаемости позволяет наиболее объективно подойти к определению реальной опасности воздействия радиоволн и других факторов (рентгеновских излучений, шумов и т. д. — см. п. 7.4.2, 7.4.3). С другой стороны, при измерениях внутренних полей вблизи излучающей аппаратуры индивидуальные дозиметры работают гораздо эффективнее обычных интенсиметров, так как используют малогабаритные антенны. Последнее обстоятельство несколько компенсирует кажущуюся недооценку облучаемости, полученную с помощью дозиметров.

Разработанная к настоящему времени техника радиометрии позволяет быстро и с необходимой точностью определить энергетические параметры облучения человека в зоне действия внешних и внутренних полей. Наиболее перспективным методом радиометрии является дозиметрия излучений, позволяющая автоматически учесть интенсивность и время воздействия поля.

Основная цель организации системы последовательного контроля радиобезопасности (СПКР), т. е. методов прогноза и радиометрии, — предоставление достаточно обоснованных исходных данных для проведения в зоне работы мощных радиоисточников комплекса защитных мероприятий, обеспечивающих безопасность человека. Рассмотрению этого вопроса посвящена гл. 7.

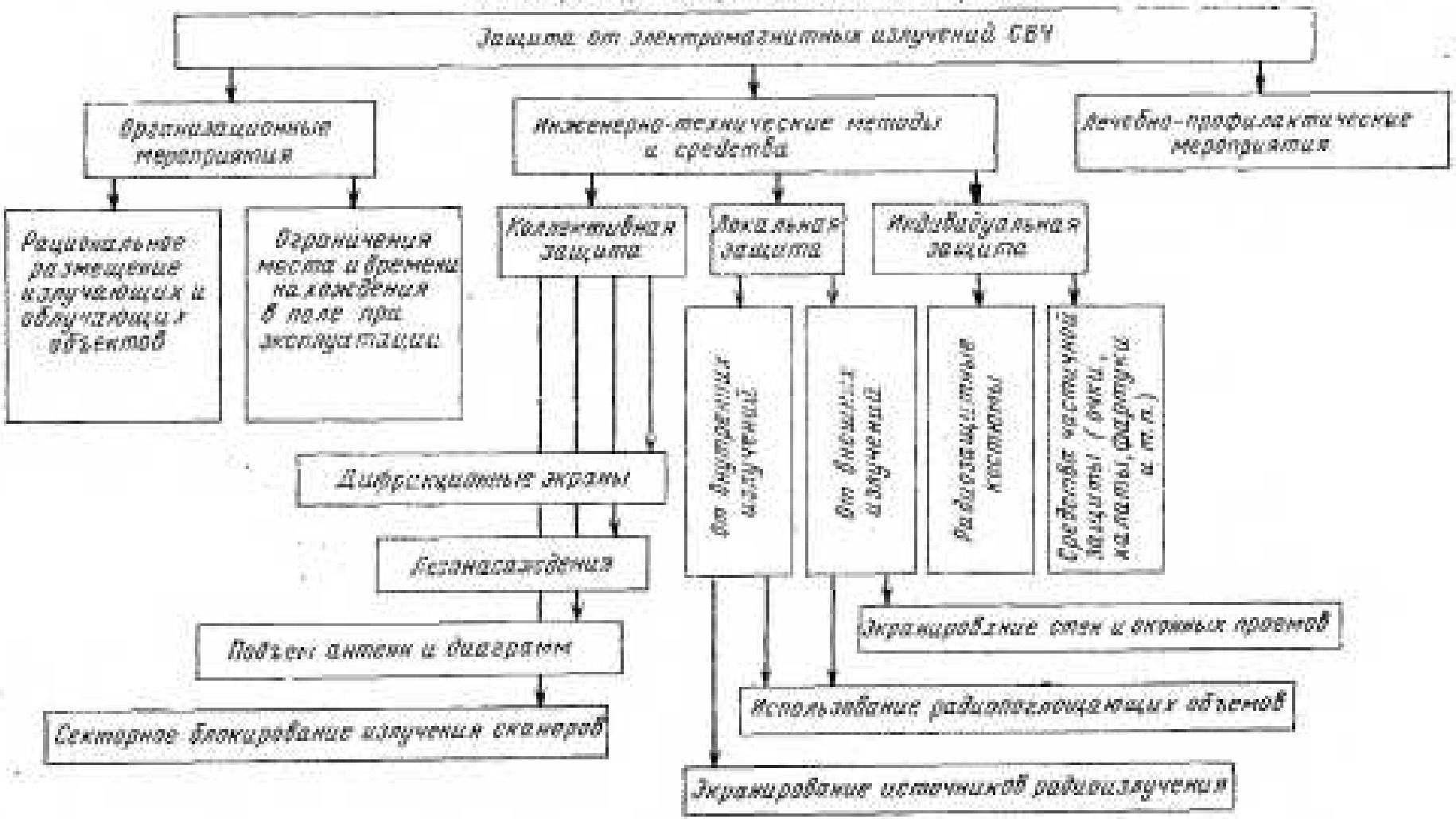
7. ТЕХНИКА ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВЧ ПОЛЕЙ. СОПУТСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

Защита — это заключительный этап всего цикла работ, направленных на обеспечение безопасности персонала и населения, находящихся в зоне действия мощных радиотехнических средств СВЧ. В большинстве случаев под защитой понимаются любые мероприятия, направленные на снижение эффективности воздействующего фактора.

К настоящему времени разработано и освоено много разнообразных способов и средств (конструкций, материалов), предназначенных для защиты людей от СВЧ радиоизлучений. Многие из них уже заняли прочное место в промышленности, другие находятся пока еще в стадии разработки и испытания. Здесь мы попытаемся дать некоторые сведения об основах защиты от СВЧ.

Разными исследователями предлагаются различные принципы классификации защитных мероприятий. Один из них приведен в схеме на стр. 275. Из схемы видно, что все средства и методы защиты разделены условно на три группы: организационные, инженерно-технические и лечебно-профилактические. Первая из них направлена на оптимизацию проектирования взаимного расположения облучающих и облучаемых объектов, а также на такую организацию работы и отдыха, при которой удается снизить до минимума время нахождения людей под облучением и предотвратить их попадание в зоны с высокой ППМ. Цель лечебно-профилактических мероприятий (уже рассмотренных в гл. 2) — повышение сопротивляемости (резистентности) организма к воздействию поля СВЧ и лечение (обычно после стрессорных воздействий при аварийных ситуациях). Инженерно-технические методы и средства направлены на прямое снижение интенсивности поля до допустимого уровня и потому, на наш взгляд, являются основными. Многие из них известны широкому кругу специалистов (см., например, [35, 39, 74, 75, 139, 162, 163]) и поэтому здесь, в гл. 7, рассмотрены лишь вкратце. Другие, на наш взгляд, менее известные или относительно недавно разработанные, рассмотрены более подробно. В главе приведены также некоторые сведения по защите от шума и рентгеновских излучений — наиболее частых из сопутствующих факторов на РТС СВЧ.

Классификация защитных методов и средств



Проектирование любой системы защиты начинается со сравнения допустимого максимума ППМ, определенного в соответствии с принятыми нормативами, с уровнем поля, полученным методами прогноза или измерения. В результате такого сравнения получают величину необходимого ослабления электромагнитной энергии.

Искусство выбора методов защиты состоит в поиске оптимума по экономической целесообразности с учетом сроков ввода в строй станции, влияния на характеристики антенны, эксплуатационных удобств и т. д. Нетрудно себе представить систему защиты, реализующую степень ослабления 20, 30 или даже 50 дБ, но в большинстве случаев из-за высокой стоимости, неудобства эксплуатации она оказывается практически неприемлемой.

Пожалуй, наименее дорогостоящей является защита, использующая естественные экраны: существующие нежилые постройки, лесные полосы, насыпи и возвышенности. Правильный учет распространения и распределения радиоволн дает возможность здесь сочетать защитные свойства, эстетику и гигиену, особенно если речь идет о лесных полосах. В связи с этим любой инженерный расчет системы защиты начинается с изучения местности. Опытный инженер-проектировщик, например, никогда не допустит, чтобы антенна РТС, работающая с малыми углами места, была расположена ниже населенного пункта, тем более если между ними прямая видимость. Проектировщик должен проверить экспериментально или рассчитать затухание имеющихся лесных посадок и заставить строителей сохранить их по возможности неприкосновенными. Важно уметь использовать для защиты и естественные складки местности. Например, поставив излучающую станцию за пригорок и исключив прямую видимость населенный пункт — антенна станции, интенсивность облучающего поля можно снизить от нескольких раз до нескольких десятков раз фактически без всяких дополнительных затрат.

Методы и средства защиты удобно (хотя и не общепринято) делить по объему (или масштабу) на *коллективные*, предполагающие защиту группы домов, жилых районов или даже целого населенного пункта, *локальные* (защита отдельных строений, квартир и помещений) и средства защиты *индивидуального пользования*.

Вообще говоря, при прочих равных условиях всегда предпочтительнее применять коллективные методы и средства, позволяющие решать задачу охраны целого жилого массива, включая людей, находящихся вне помещений. Эта система защиты допускает использование относительно простых методов контроля, обычно проще обслуживается и имеет ряд других достоинств. Между тем, система коллективной защиты далеко не всегда реализуется, она нецелесообразна при защите небольших населенных пунктов, поэтому в таких случаях используют локальные методы защиты, т. е. прибегают к экранированию отдельных помещений и излучателей.

Проводить защиту людей от внутренних источников излучений наиболее целесообразно непосредственно в месте проникновения электромагнитной энергии из экранирующих кожухов улучшением методов радиогерметизации стыков и сочленений. При экранировании излучений открытого конца волновода или антенны, работающей на передачу прямо в помещении, обычно используются специальные насадки с радиопоглощающей нагрузкой, создающей для антенны эффект, близкий к эффекту свободного пространства.

При защите помещений от внешних излучений с успехом применяются оклеивание стен специальными металлизированными обоями, засетчивание окон, применение специальных металлизированных штор и т. п.

Наконец, в некоторых случаях наряду с применением обычных металлических «окружающих» экранов рекомендуется применять дополнительные небольшие объемы радиопоглощающих материалов, снижающих «добротность» помещений. Применение поглощающих объемов хорошо известно в акустике как способ уменьшения времени реверберации и «смягчения» частотных характеристик помещений, приспосабливаемых для звукозаписи и вещания. Целесообразность применения радиопоглощающих объемов в технике СВЧ должна быть определена в каждом конкретном случае.

Пока индивидуальные средства защиты, поскольку они стесняют движения работающего и несколько ухудшают гигиенические условия в «подзащитном» пространстве, особенно при пользовании костюмом, могут быть рекомендованы для применения только в особых случаях: для прохода через особо опасные зоны, при ремонтных работах в аварийных ситуациях, во время крат-

ковременных настроечных и измерительных работ в антенном поле и т. п.

Одновременно с разработкой средств защиты разрабатываются и способы контроля их защитных свойств. Некоторые из них предполагают использование обычных интенсиметров, но чаще всего требуют создания аппаратуры, отвечающей особым требованиям в отношении чувствительности, динамического диапазона, характеристик зондов и т. п. Поэтому о некоторой разработанной и уже используемой аппаратуре контроля кратко будет рассказано ниже.

В § 7.2 и 7.3 изложены только основы радиотехнического расчета средств защиты, без описания вопросов технологии, подробно описанной в литературе.

7.2. КОЛЛЕКТИВНАЯ ЗАЩИТА

В этом параграфе мы рассмотрим в основном вопросы, связанные с расчетом экранов на местности, у которых, как правило, высота ограничена (экономическими и технологическими соображениями) и для которых необходим специальный учет дифракционного поля через верхнюю (реже боковые) кромку. Опыт показывает, что постановка этих экранов (будем называть их дифракционными) без учета эффекта дифракции, только с учетом коэффициента затухания материала, приводит неизбежно к значительным ошибкам, вплоть до случаев, когда интенсивность поля за экраном вследствие дифракции на кромке оказывается близкой к интенсивности незащищенного объекта. К этому же эффекту иногда приводит наличие побочных переотражателей, не влияющих, казалось бы, на поле в глубокой тени экрана.

Выше (п. 5.1.5) мы уже упоминали о возможности расчета необходимого подъема антенны или диаграммы для снижения интенсивности поля на местности. Здесь мы дадим краткий расчет по формулам и номограмме, позволяющий в этом случае обойтись без специального построения ВДИ. Будет также кратко рассмотрен вопрос расчета сектора выключения станций со сканирующей диаграммой. Вопросы технической реализации этого способа полностью зависят от конкретных особенностей станций и потому здесь не рассмотрены.

7.2.1. Дифракционные экраны. При разработке дифракционных экранов приходится учитывать по крайней мере три фактора: уровень дифракционного затухания (через верхнюю кромку), сквозное затухание, обусловленное проникновением энергии сквозь материал экрана, и наличие боковых дифракционных связей (при ограниченной длине экрана), рассчитываемых по обычным формулам дифракции. Кроме того, необходим учет влияния отдельно расположенных больших радиоотражающих

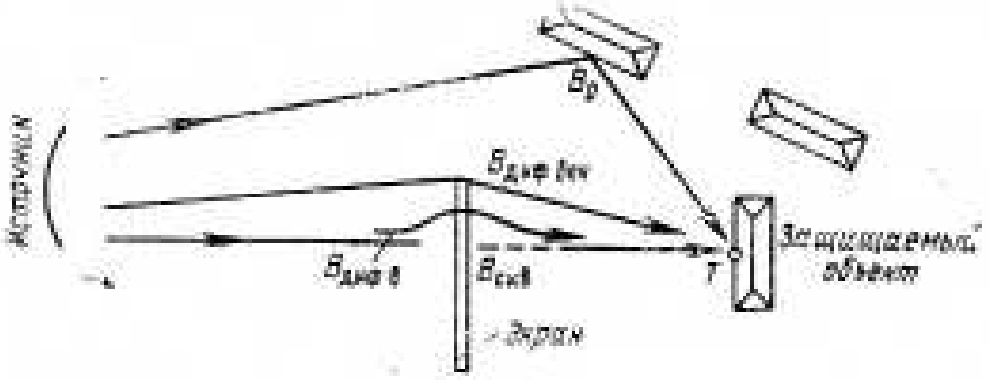


Рис. 7.2.1. Защита объекта экраном на местности (вид сверху, общий случай).

щих поверхностей и одиночных излучателей, в некоторых случаях увеличивающих уровень поля в глубокой тени (рис. 7.2.1).

Сквозное затухание материала может быть определено несколькими путями. При использовании металлической сетки очень удобно применять номограмму, приведенную в работе Мамфорда [84]. Затухания (в децибелах) для некоторых стандартных типов сеток, рассчитанные по этой номограмме, будут приведены в табл. 7.3.1. В табл. 7.2.1 приведены данные затухания некоторых строительных материалов. При расчете затухания сплошных металлических листов (применяемых, правда, очень редко) приходится учитывать не затухание чистого листа (оно всегда оказывается очень большим), а затухание листа в конструкции, т. е. с учетом элементов крепления, неплотностей в стыках и т. п. Затухание таких экранов лучше всего определять экспериментально. Как правило, оно оказывается не меньше затухания сетчатых экранов.

Расчет **дифракционного затухания** был приведен выше, в п. 5.2.3, где даны графики для определения поля дифракции на полубесконечном клине с ровной гладкой

Таблица 7.2.1

Защитные свойства различных строительных материалов в децибелах [23]

Материал и конструкция	Длина волны	
	сантиметровые	метровые
Кирпичная капитальная стена толщиной 70 см	20	12
Внутренняя оштукатуренная переборка толщиной 15 см	10...12	2,5
Деревянная переборка из одного слоя сосновых досок толщиной 30 мм	1...2,5	
Оконное стекло толщиной 3 мм	1...3	—
Окно с целой одинарной рамой	4,5	3
То же с двойной рамой	7	3,5

кромкой. Обычные экранные конструкции не являются полубесконечными, но если учесть, что размеры экрана значительно больше длины волны, толщина кромки значительно меньше длины волны, нижний край экрана углублен в землю на расстояние, обеспечивающее достаточно высокое затухание «через землю», длина экрана

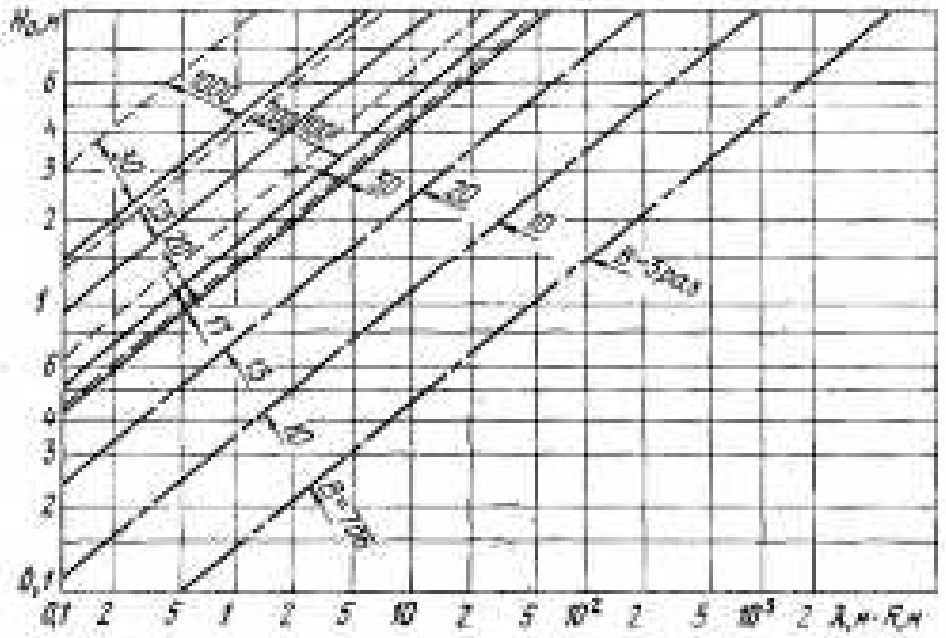


Рис. 7.2.2. Выбор превышения $H_э$ (рис. 5.2.7) в зависимости от величины необходимого параметра λR для нескольких значений B:

—— вектор E параллелен кромке; — — — вектор E перпендикулярен кромке; — · — общий случай.

выбрана значительно больше высоты, то оказывается, что дифракционное затухание $B_{\text{диф}}$ можно определять на основании классических формул и графиков. График, приведенный в п. 5.2.3, получен экспериментально Иокото Кэпъити и в отличие от известных в оптике учитывает поляризацию волны [57] (в этой же работе приведены экспериментальные данные влияния изрезанности кромки). Для эффективной защиты необходимо, чтобы кромка экрана была выше оптической оси источник — облучаемый объект. На рис. 7.2.2 приведена зависимость величины этого превышения от заданной величины затухания B для нескольких значений λR.

На практике наиболее трудным для учета оказывается влияние **побочных переизлучений**, возникающих из-за отражений от находящихся на относительно небольших расстояниях гладких радиоотражающих поверхностей (например, стен крупных строений), больших массивов леса и даже отдельных металлических элементов (деталей сооружений и т. п.), резонирующих на рабочей длине волны.

Если имеется более или менее выраженная отражающая поверхность, расчет затухания может быть проведен обычными методами, учитывающими коэффициент отражения и диаграмму направленности отражающей поверхности. При попадании расчетной точки точно в отраженный луч интенсивность поля оказывается зависимой только от расстояния и потерь при отражении, учитываемых коэффициентом отражения $F_{\text{э}}$. В этом случае общее затухание при отражении

$$B_{\text{отр}} = (R_{\text{отр}}/R_{\text{пр}})^2 F_{\text{э}}, \qquad (7.2.1)$$

где $R_{\text{пр}}$ — прямое расстояние источник — точка наблюдения, $R_{\text{отр}}$ — расстояние источник — отражающая плоскость — точка наблюдения.

Формула (7.2.1) показывает, что при попадании защищенного экраном объекта в отраженный от больших поверхностей луч снижение интенсивности поля по сравнению с уровнем поля без экрана незначительно превышает $F_{\text{экр}}$.

Методы учета влияния **одиночных переизлучателей**, приемлемые для практического использования, в настоящее время не найдены. Интенсивность отраженного луча таких излучателей зависит от очень многих причин и прежде всего от отношения длины переизлучателя к дли-

не падающей волны, от угла ее падения, материала переизлучателя и т. п.

Вообще говоря, на практике расчет $B_{отр}$ (тем более от одиночных переизлучателей) неизбежно связан с использованием ряда допущений и носит чисто качественный характер, поэтому для получения достоверных данных он может быть рекомендован как предварительный этап перед инструментальной проверкой. Конструктивно дифракционные экраны представляют собой ме-

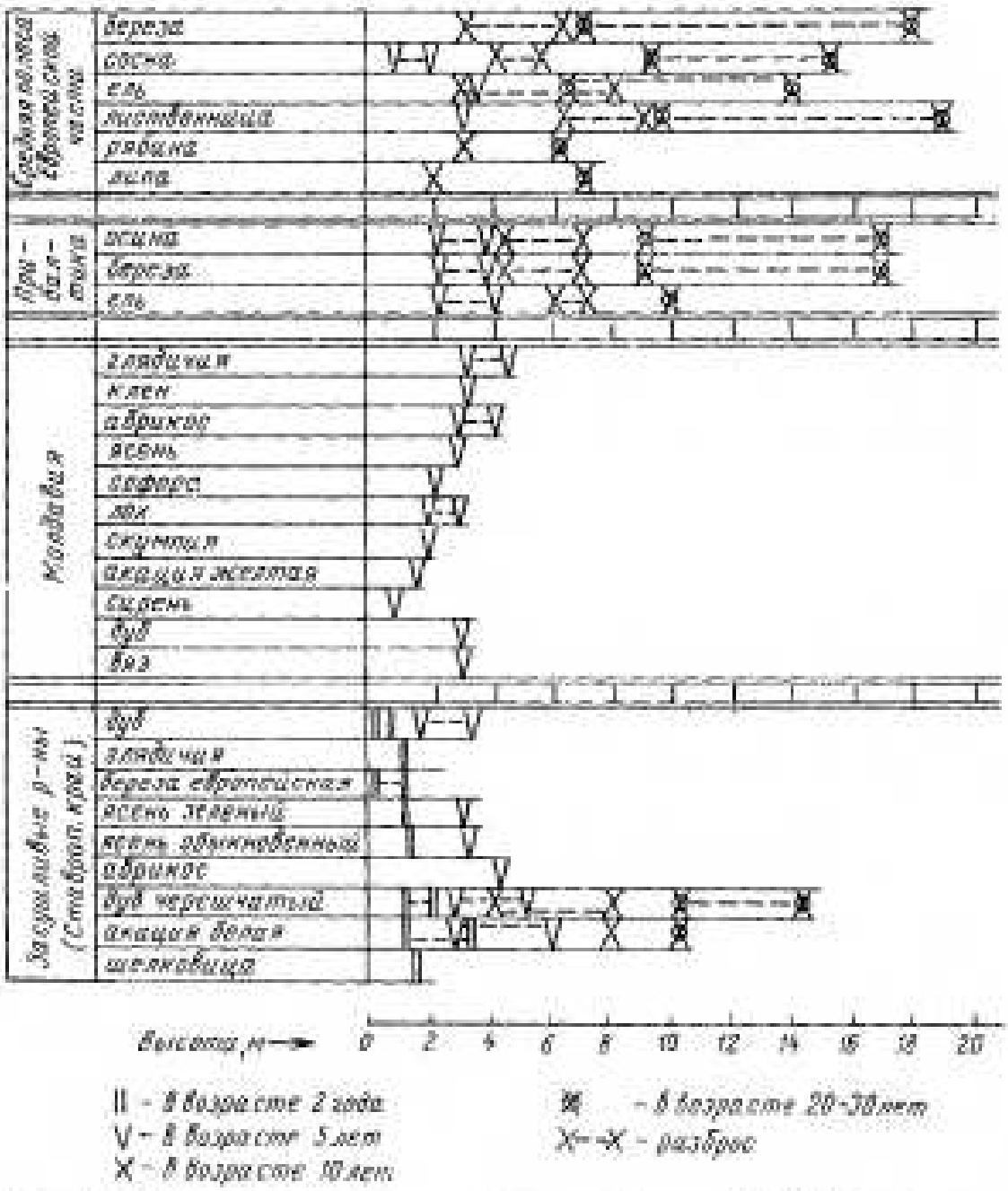


Рис. 7.2.3. Высота деревьев в отдельных районах СССР (по данным табл. 7.2.2).

Таблица 7.2.2

Высота (в метрах) древесных пород (чистых и в смешанном лесу) по данным различных авторов

	Древесные породы	Возраст, лет			
		2	5	10	20...30
СССР, Уманское и Истринское водохранилище [60]	Береза			6,1	14...18
	Сосна			4	9...14
	Лиственница			6	9...17
	Ель			2,8	6
	Рябина			3	6
	Береза			2,5	6...10
	Ель			2	7
	Липа			2	7
	Сосна		0,6...1,4	4	13
	Сосна		2,1	5,5	15
	Лиственница		3,1	7,6	19
	Сосна		3,6	7,8	14
	Ель		2	6,5	13
	Лиственница		3,1	9,0	12
СССР, Приазовская [59]	Осина		2...4	6...7	10
	Береза				
	Ель				
	Насаждения кисличные, черничные с елью, осиной и березой			4...7	9...17
СССР, Ставропольский край [46]	Гледичия (50...118*)		3,1...4,5		
	Клен		3,1		
	Абрикос (8...129)		2,8...4		
	Ясень		2,5		
	Софора		2,1		
	Лох (30...70)		1,9...2,5		
	Скумпия		1,6		
	Акация желтая		1,4		
	Сирень		0,8		
	Дуб (17...75)		2,4		
	Вяз мелколистный (60...111)		2,5		

Продолжение табл. 7.2.2

	Древесные породы	Возраст, лет			
		2	5	10	20...30
СССР, Молдавия [73]	Дуб Береза европейская	0,6 0,5			
	Дуб Ясень зеленый		1,5 2,5		
	Дуб		3		
	Дуб Абрикос		2,8 4,1		
	Дуб Ясень обыкновенный Береза европейская	0,6 1,2 0,5			
	Дуб черешчатый Акация белая	1...2	2,5...5	4,8	10...14
	Акация белая Ясень зеленый Береза европейская	3,2 1,0 0,5			
	Акация белая Шелковица Ясень обыкновенный		5,5 1,5 2,9		
ГДР [165]	Акация белая	1,8...3	6	8	14
	Береза бородавчатая до 1 м в год	0,3			11...15
	Береза бумажная	0,6...1			
	Осина		3...9	11	13...18
	Тополь		6...7	10...12	18...23
	Рябина		3	4	6...11
	Белая акация		5...8	7...10	13...16
США, Великие равнины [154]	Тополь			5	8
	Ива сибирская			3,6	5,8
	Ива американская			2,4	5
	Ива			3	4,3
	Ясень зеленый			2,4	4,2
	Клен ясенелистный			3,2	3,6
	Сосна обыкновенная			2,5	7
	Ель колючая			1,7	4
	Сосна желтая			1,7	4
	Ель голубая			1,2	3,8
	Сосна смолистая			1,7	3
	Акация желтая			1,8	3
	Черемуха виргинская			2,2	2,6
	Слива американская			1,7	2,2

* Цифры в скобках показывают прирост в год (в см)

Таблица 7.2.3.

Средняя высота, ширина кроны и выживаемость отдельных древесных пород по данным американских авторов [154]

Древесные породы	Возраст, лет								
	5	10	15 . . . 30	5	10	15 . . . 30	5	10	15 . . . 30
	средняя высота, м			ширина кроны, м			выживаемость, проценты		
Лиственные породы:									
ясень зеленый	1,6	2,7	4,4	0,8	1,6	2,3	88	78	57
клен ясенелистный	2,3	3,1	3,7	1,3	2,5	3,2	89	71	44
тополь равнинный	3,3	4,8	3,9	—	—	4,1	81	15	12
вяз американский	1,4	2,8	5,1	0,8	1,4	2,9	65	52	48
вяз сибирский	2,2	3,7	6,0	1,3	3,1	3,9	72	67	53
гледичия	0,9	—	—	0,7	—	—	—	—	—
тополь	2,6	5,5	6,8	—	—	3,9	80	45	3
ивы	1,5	3,2	4,6	—	—	3,5	28	16	2
Хвойные породы:									
сосна желтая	0,6	1,5	3,9	4,2	0,9	2,3	15	7	6
сосна обыкновенная	0,9	2,6	6,8	—	1,5	2,8	12	10	4
можжевельник красный	0,6	1,2	—	0,6	1,9	—	49	49	—
ель голубая	0,6	1,2	3,9	0,3	0,9	2	36	24	11
ель сизая	0,8	1,5	4,5	0,7	1,1	2,6	35	34	31
ель западная	0,6	1,2	—	0,9	—	4	81	24	—
Лиственичные кустарники:									
крушина даурская	1	—	—	0,9	—	—	68	—	—
жимолость татарская	0,9	—	—	0,6	—	—	62	—	—
клен татарский	1,6	1,7	2,2	—	—	1,7	69	33	10
желтая акация	1,2	1,8	3	0,6	1,3	2,5	84	81	81
черемуха виргинская	1,5	2,2	1,7	1,5	—	1,2	92	75	34
лох узколистный	1,6	2,4	3,4	1,9	2,1	2,8	74	55	45

таллическую сетку (чаще всего стальную) толщиной 1...2 мм, натянутую на металлическую или деревянную раму, для прочности разделенную на отдельные секции. Рама врыта в землю с соблюдением необходимых предосторожностей против гниения дерева и ржавления стали.

7.2.2. Искусственные и естественные лесонасаждения. Искусственные лесонасаждения могут быть использованы для получения небольших затуханий (находящихся в пределах 3 ... 10 дБ, зачастую в профилактических целях), когда сроки экранирования могут быть растянуты на 5 ... 7 лет. Это обусловлено тем, что скорость роста деревьев в наших условиях не превышает 0,2...1 м/год (см. табл. 7.2.2 и 7.2.3, а также рис. 7.2.3). Лесонасаждения, устраиваемые для радиозащиты, как правило, располагаются в непосредственной близости от защищаемых объектов, поэтому здесь нет смысла учитывать дифракционное затухание и защитные свойства лесной полосы можно рассчитать на основании только сквозного затухания. В редких случаях, когда защищаемый населенный пункт имеет большую протяженность в глубину при очень густой полосе высоких деревьев, необходим расчет дифракционного затухания.

Анализ данных роста и густоты кроны деревьев и кустарников позволяет увидеть возможность успешного использования зеленых насаждений для защиты от радиоизлучений. При этом, однако, приходится учитывать следующее:

1. Величины затухания, которые можно получить в реальных условиях, довольно ограничены и обычно не превышают на сантиметровых волнах значений 15...25 дБ; с уменьшением частоты затухание уменьшается.

2. Имеются довольно четкие ограничения почвенно-климатического характера, предопределяющие выбор сортов насаждений и скорость их роста.

3. Минимальные сроки получения «защитного эффекта» от защитных насаждений находятся в пределах 3 ... 7 лет после их закладки.

В некоторых случаях эти ограничения не являются существенными, и зеленые насаждения, заложенные с началом строительства объекта, уже к концу обычного срока строительства могут служить хорошим укрытием на переходах между зданиями, в местах скопления и

отдыха персонала и т. п. Одновременно посадки зеленых насаждений, как правило, приводят к заметному улучшению микроклимата на всей территории объекта; немаловажен и такой фактор, как улучшение общей эстетики объекта. При выборе сортов пород данные, приведенные в таблицах, следует считать ориентировочными. Конкретные рекомендации по выбору сортов, условиям посадки и т. п. следует получить у местных специалистов.

Расчет сквозного затухания может быть проведен на основании рис. 7.2.4, обобщающего ряд экспериментальных и расчетных данных (см. текст сноски). Расчет дифрак-

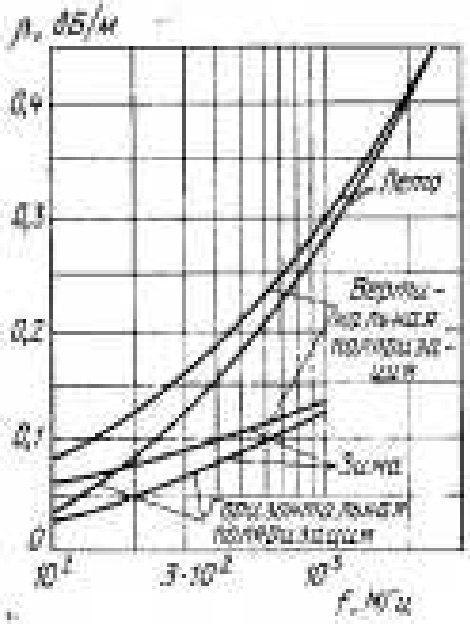


Рис. 7.2.4. Сквозное затухание леса зимой и летом; для хвойных пород расчет ведется только по кривой, соответствующей летним условиям *.

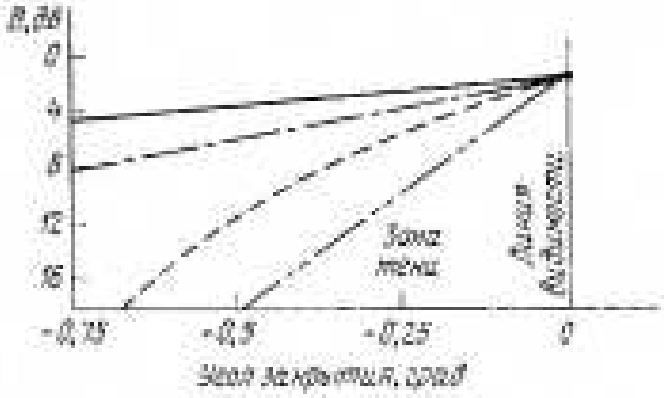


Рис. 7.2.5. Дифракционное затухание лесной полосы для длины волны $\lambda = 10{,}4$ см (пример).

——— эксперимент в Baxlco» (основной лес); — · — дифракция на клине; — — — эксперимент в Balkoo» (луб, кедр); — · · — дифракция на сфере.

ционного затухания лесной «кромки» в значительной мере осложнен «нерегулярностью» изрезанности кромки, явно выраженной диффузностью элементарных (от каждой ветки) отражений и нестабильностью отражений из-за влияния ветра. Аппроксимация лесной кромки металлическими — острыми и закругленными (с различными радиусами кривизны) — поверхностями может

* Кривые построены по данным, взятым из следующих источников: Аренберг А. Г. Распространение сантиметровых и дециметровых волн. М., «Сов. радио», 1957; Сектон, Лейк. Влияние деревьев и других препятствий при приеме на метровых и дециметровых волнах. — «Вопросы радиолокационной техники», 1955, № 5, (29); Bachinski M. P. Microwave propagation over rup-surfaces. — «RCA Rev.», 1959, № 2, p. 308—331.

быть использована только для предварительных расчетов с последующей перепроверкой инструментальными методами. На рис. 7.2.5 в качестве примера приведены данные исследования дифракционного ослабления в зоне тени лесной полосы на длине волны $\lambda = 10{,}4$ см, полученные для условий, отличающихся практически только видом деревьев. Расстояние лес — точка наблюдения около 150 м [189].

7.2.3. Подъем антенн или их диаграмм. Таким способом удается достичь эффективного снижения облучаемости территории полем РТС с высоконаправленными антеннами. С подъемом антенны РТС, как правило, улучшаются многие характеристики станции (например, увеличивается дальность обнаружения РЛС низколетящих объектов, увеличивается дальность работы связных средств и т. д.), но при этом неизменно ухудшается устойчивость конструкции антенны в отношении воздействия ударной волны, усложняется и удорожается установка и зачастую эксплуатация станции.

Метод защиты путем подъема антенны РТС основан на том, что облучаемая территория вблизи РТС оказывается под воздействием дальних боковых лепестков, так что образуется значительная область тени. На больших расстояниях из-за уширения луча этот способ защиты, однако, нельзя считать достаточно эффективным, и к нему обычно не прибегают. Подъем РТС обычно осуществляется с помощью земляных насыпей или эстакад. Для подъема диаграммы используют качание всего зеркала или облучателя.

При подъеме диаграммы направленности эффект приблизительно одинаков на больших и средних расстояниях, но заметно снижается на малых, т. е. в области больших углов диаграммы, где интенсивность излучений, как известно, имеет очень слабую тенденцию к снижению с увеличением угла (см. рис. 1.2.5, 4.2.6—4.2.17 и [70]).

Примем следующие обозначения: $П$ — ППМ до проведения мер по защите (подъема антенны или увеличения угла наклона), $П_з$ — ППМ, необходимая для защиты объекта; Δ и ε — превышение центра антенны над расчетной точкой и угол наклона до проведения защиты; $\Delta_з$ и $\varepsilon_з$ — то же после проведения; $R_{т\,п}$ — расстояние от антенны до защищаемого объекта.

Проще всего рассчитать заданные $\Delta_з$ или (и) $\varepsilon_з$, имея ВДИ станции. Для определения $\Delta_з$ необходимо на ВДИ

параллельно прямой AB (рис. 7.2.6), соответствующей рабочим ε, Δ и $П$, через точку ($R_{т.п}$, $П_э$) провести прямую $A'B'$. Слева, по шкале превышений, отсчитывается значение $\Delta_э$, точнее разность $\Delta_э - \Delta$, которая и учитывается при проектировании сооружений для подъема антенны РТС. Аналогично можно определить новый угол наклона $\varepsilon_э$. В этом случае вместо прямой $A'B'$ следует провести прямую через точки ($R_{т.п}$, $П_э$) и A (рис. 7.2.7). В обоих случаях угол θ увеличивается (см. рис. 5.1.1).

Определить $\Delta_э$ и $\varepsilon_э$ можно и аналитически. Воспользуемся выражениями (5.1.1а) и (4.3.40) и примем первоначально за изменяемую величину Δ. После подстановки (5.1.1а) в (4.3.40) для $n > 0{,}66$ (обычный случай) получаем

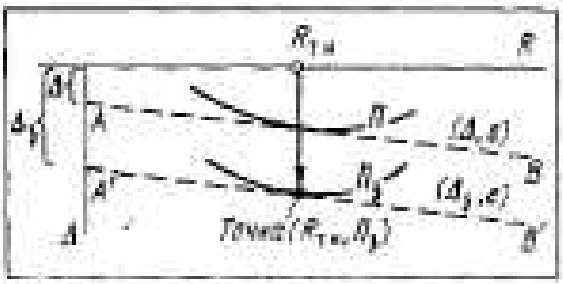


Рис. 7.2.6. Определение по ВДИ необходимого подъема антенны ($\Delta_э - \Delta$) при неизменном угле наклона ε.

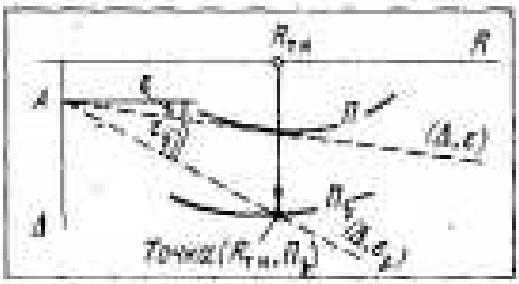


Рис. 7.2.7. Определение по ВДИ необходимого угла подъема диаграммы ($\varepsilon_э - \varepsilon$) при неизменной высоте антенны.

$$\left(\frac{M}{M_э}\right)^{\frac{k_1-6,1}{4,02}} = \frac{П_э}{П} = \frac{\Delta + \varepsilon R}{\Delta_э + \varepsilon R}, \qquad (7.2.2)$$

откуда

$$\Delta_э = (\Delta + \varepsilon R)(П/П_э)^{\frac{4,02}{k_1-6,1}} - \varepsilon R. \qquad (7.2.3)$$

Аналогично получаем

$$\varepsilon_э = \left(\varepsilon + \frac{\Delta}{R}\right)\left(\frac{П}{П_э}\right)^{\frac{4,02}{k_1-6,1}} - \frac{\Delta}{R}. \qquad (7.2.4)$$

Разделив оба выражения на последний член, получим

$$\frac{\Delta_э}{\varepsilon R} = \left(\frac{\Delta}{\varepsilon R} + 1\right)\left(\frac{П}{П_э}\right)^{\frac{4,02}{k_1-6,1}} - 1 \qquad (7.2.5)$$

и

$$\frac{\varepsilon_э R}{\Delta} = \left(\frac{\varepsilon R}{\Delta} + 1\right)\left(\frac{П}{П_э}\right)^{\frac{4,02}{k_1-6,1}} - 1.$$

Эти выражения легко номографируются. Обратим внимание на то, что диапазон изменений значений $\varepsilon R/\Delta$ и $\Delta/\varepsilon R$ приблизительно одинаков, строим для обеих функций одну номограмму (рис. 7.2.8).

Пределы применимости номограммы обычные: $0° \leqslant \varepsilon \leqslant 30 \ldots 60°$, $n_{\min} = 0{,}66$; $n_{\max} = 10$ (в крайнем случае до 15 ... 20); $R \geqslant 5{,}73\,(2x/\theta_{0{,}5})$; $\Delta > 0$; $\varepsilon > 0$.

Правила пользования номограммой

1. По известным ε, Δ и R для определения ε_3 рассчитываем $B_\varepsilon = \varepsilon° R/57{,}3\Delta$, для определения Δ_3 — $B_\Delta = \Delta \cdot 57{,}3/R\varepsilon°$.

2. По известным Π/Π_3, δ_3 и рассчитанным B_Δ или B_ε определяем по номограмме $B_{3\Delta}$ и $B_{3\varepsilon}$. По найденным B_3 рассчитываем $\Delta_3 = \Delta\,(B_{3\Delta}/B)$ или $\varepsilon_3 = \varepsilon\,(B_{3\varepsilon}/B)$.

Пример

Задано $\Pi/\Pi_3 = 60$; $\delta_3 = 14$ дБ; $\varepsilon = +3°$; $\Delta = 5{,}5$ м; $R = 200$ м, $2x = 10$ м, $2\theta_{0{,}5\Delta} = 6°$.

1. Проверка условий

а) $0{,}1R_{\Sigma\,\min} = 5{,}73 \cdot 10/3 = 19$м $\quad R > 0{,}1R_{\Sigma\,\min}$.

б) $\theta \approx \Delta \cdot 57{,}3/R + \varepsilon = 4°{,}6$, $n = 0{,}77$, т. е. $n > 0{,}66$.

2. Рассчитываем $B_\varepsilon = 3 \cdot 200/57{,}3 \cdot 5{,}5 = 1{,}9$; $B_\Delta = 5{,}5 \cdot 57{,}3/200 \cdot 3 = 0{,}53$.

3. По номограмме находим $B_{3\Delta} = 12{,}1$ и $B_{3\varepsilon} = 22{,}5$.

4. Рассчитываем $\Delta_3 = 12{,}1 \cdot 5{,}5/0{,}53 = 126$ м; $\varepsilon_3 = 22{,}5 \cdot 3/1{,}9 = 35°$.

5. Повторная проверка условия для n

$\theta_\Delta \approx \varepsilon + \Delta_3 \cdot 57{,}3/R = 3 + 126 \cdot 57{,}3/200 = 39$;
$n = 39/6 = 6{,}5$;
$\theta_\varepsilon \approx \varepsilon_3 + \Delta \cdot 57{,}3/R = 35 + 5{,}5 \cdot 57{,}3/200 = 36{,}6$;
$n = 36{,}6/6 = 6{,}1$.

} Условие выполнено: $n < 10$

Кроме рассмотренных выше, к основным методам коллективной защиты можно отнести также постановку радиопоглощающих щитов непосредственно у антенны станции, частичное снижение мощности при проходе луча сканера над защищаемым объектом; снижение до минимума, когда это возможно, времени работы станций на излучение. Однако применение их связано с нежелательными изменениями технических характеристик или режима работы станций, поэтому к ним прибегают очень редко.

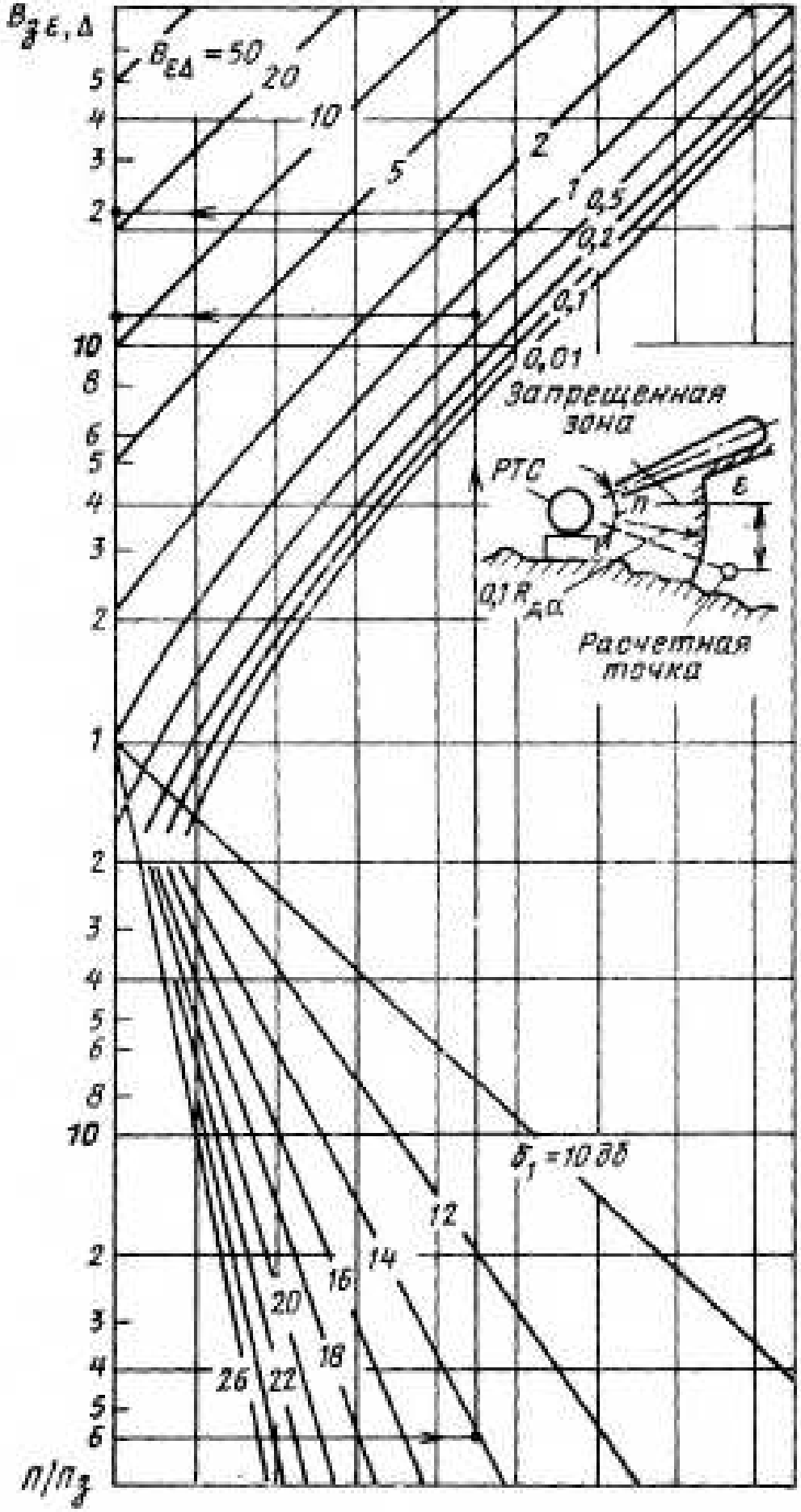


Рис. 7.2.8. Номограмма для определения $\varepsilon_{\text{в}}$ и $\Delta_{\text{в}}$.

Средства и методы ограниченной защиты можно назвать подчиненными по отношению к общей защите, хотя по эффективности и массовости применения они, как правило, превосходят коллективные. Причиной этого является, прежде всего, высокая стоимость коллективных средств защиты, а иногда и действительно малый технический эффект при разумных затратах. Например, при рассмотрении расчетных графиков для определения величины дифракционного затухания непрозрачных экранов можно было заметить, что их постановка перед защищаемыми объектами с большой протяженностью в глубину неэффективна. То же можно сказать о подъеме излучающих антенн: эффективность этого способа уменьшается с удалением защищаемого объекта от антенны. Основой методов локальной защиты (выделение метода локальной защиты в отдельный класс до сих пор остается дискуссионным) является экранирование каналов просачивания электромагнитной энергии в защищаемый объем извне или из находящегося в нем кожуха, экранирующего излучающую аппаратуру. Индивидуальные средства предохраняют от облучения все тело или отдельные его части, наиболее чувствительные к воздействию радиоволн.

И локальные и индивидуальные средства защиты предполагают использование радиоотражающих (экранирующих), в некоторых случаях поглощающих материалов (РЭМ и РПМ), которые должны удовлетворять комплексу необходимых радиотехнических и механических, гигиенических, технологических и эстетических требований. На практике это удается далеко не всегда. Отсюда отсутствие универсального РЭМ и РПМ и необходимость подбора материала к каждому конкретному случаю.

Ниже кратко рассмотрим принципиальные и технологические особенности применяемых в технике защиты радиозащитных материалов (РЭМ), вкратце остановимся на описании конкретных методов и средств локальной и индивидуальной защиты.

7.3.1. Принципы использования радиоэкранирующих и радиопоглощающих материалов. Для защиты имеют значение две характеристики радиозащитных материалов: за экраном — сквозное затухание; перед экраном — отражение от поверхности материала. Сквозное затуха-

ние обусловлено тепловыми потерями в толще материала (зависящими от частоты поля и толщины экрана), а также отражением электромагнитной энергии от поверхности материала. Отражение энергии обусловлено в основном несоответствием волновых характеристик воздуха и материала, из которого изготовлен экран. Сквозное затухание и отражение электромагнитной энергии определяются через коэффициенты сквозного затухания $K_{скв}$ и отражения $K_{отр}$, выражаемые как отношение соответственно прошедшей и отраженной энергии (мощности) к падающей, или через величины $B_{скв}=1/K_{скв}$ и $B_{отр}=1/K_{отр}$, которые обычно выражаются в децибелах.

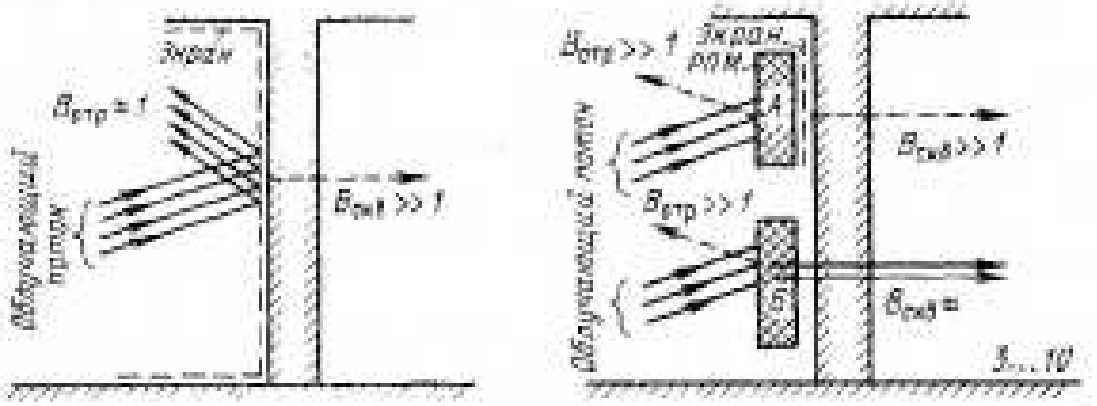


Рис. 7.3.1. Соотношения сквозного ($B_{скв}$) и отражающего ($B_{отр}$) затуханий при использовании экрана, РПМ с экраном *А* и без экрана *Б* (РПМ без экрана — крайне редкий случай); $B_{скв}$ и $B_{отр}$ в натуральных отношениях.

В зависимости от практической потребности материалы изготавливаются либо с большим коэффициентом отражения и соответственно большими $B_{скв}$ (РЭМ, экраны в виде сплошных металлических листов или сеток), либо с малым коэффициентом отражения (РПМ, выполняемые в виде объемных блоков из полупроводящих материалов, характеризующихся определенным распределением ε, μ, σ по толщине материала). В РПМ основным параметром является коэффициент отражения; сквозное затухание специально не оценивается, так как обычно вследствие наклейки фольги (с задней стороны РПМ) оно оказывается очень большим (рис. 7.3.1). В процессе разработки РПМ подбором специальных сред и распределения их электромагнитных характеристик по толщине материала добиваются очень малых отражений, вплоть до долей процента.

В радиоэкранирующих материалах, устанавливаемых между излучателем и защищаемым объектом, имеет значение фактически только сквозное затухание, которое может быть представлено как результат отражения электромагнитных волн от поверхности экрана и поглощения оставшейся высокочастотной энергии в толще экрана. Для экрана, ориентированного перпендикулярно направлению распространения волны, выражение для экранного ослабления (сквозного затухания) в дБ имеет вид [39]

$$B_{скв} = 20 \lg \left\{ \operatorname{ch} kt_э \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{Z_д}{Z_м} + \frac{Z_м}{Z_д} \right) \operatorname{th} kt_э \right] \right\}, \quad (7.3.1)$$

где $Z_д$ и $Z_м$ — волновые сопротивления соответственно диэлектрика (в частности, воздуха) и металла экрана; $k = \sqrt{j\omega\mu\sigma}$ — коэффициент вихревых токов, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; $t_э$ — толщина экрана.

Сквозное затухание (7.3.1) определяется двумя причинами: из-за отражения от поверхности экрана B_0 и из-за поглощения в толще материала экрана $B_п$:

$$B_0 = 20 \lg [1 + 1/2 (Z_д/Z_м + Z_м/Z_д) \operatorname{th} kt_э]; \qquad B_п = 20 \lg \operatorname{ch} kt_э.$$

Из приведенных формул видно, что поглощение увеличивается с ростом частоты поля, толщины, магнитной проницаемости и проводимости металла экрана, а отражение в основном определяется несоответствием волновых характеристик диэлектрика и металла. На рис. 7.3.2 приведены зависимости экранного ослабления от частоты для некоторых широко применяемых в технике экранирования материалов. Нанесение тонких проводящих прозрачных пленок (в частности, двуокиси олова) позволяет получить защитное стекло с ослаблением СВЧ поля около 30 дБ. Как видно из рис. 7.3.2, сплошные металлические листы имеют очень большое затухание, что на практике не требуется. Поэтому для защиты целесообразно использовать тонкие листы, выбирая их толщину исходя лишь из соображений механической прочности, или металлические сетки, обладающие достаточным ослаблением, но отличающиеся от листовых материалов меньшим весом и стоимостью. Ослабление сетчатых экранов зависит от размера ячеек и диаметра проволоки и с достаточной для практики точностью довольно просто определяется по номограмме [84], построенной по эмпирической формуле:

$$П/П_э = B^2/4, \qquad (7.3.2)$$

где $$B = \frac{\lambda}{a}\left(\ln\frac{0{,}83\exp 2\pi r/a}{\exp(2\pi r/a)-1}\right)^{-1},$$

$П$ и $П_э$ — падающая и проходящая ППМ (за экраном), $2r$ — диаметр проволок сетки, a — расстояние между центрами проволок.

Приведенная на рис. 7.3.3 номограмма построена для случая нормального падения энергии на сетку из параллельных проволок, когда вектор электрического поля **E**

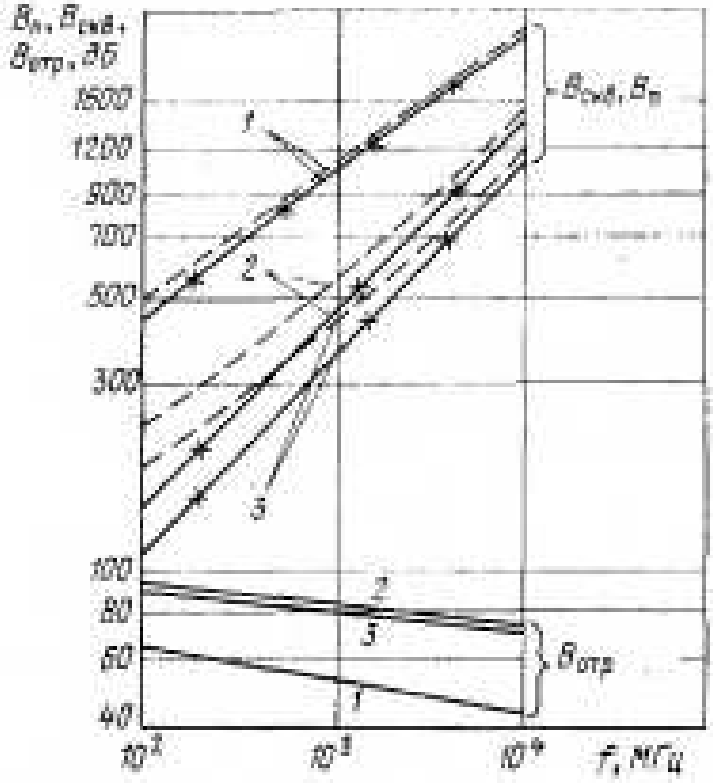


Рис. 7.3.2. Зависимость экранного ослабления металлического листа толщиной 0,05 мм от частоты:

1 — для стали; *2* — для меди; *3* — для алюминия; — — — $B_{скв}$; —×—×— $B_п$; ——— $B_{отр}$

им параллелен. Номограмма применима и для сетчатых экранов, при этом считается возможным пренебречь действием проволок, перпендикулярных вектору **E**. Для пользования номограммой необходимо линейкой соединить точку (a/λ) на левой шкале с точкой (a/r) на правой шкале. Пересечение линейки со средней шкалой $[10\lg(П/П_э)]$ и даст ослабление в дБ, вносимое сеткой. При выборе сеток необходимо ориентироваться на типы сеток, выпускаемых промышленностью, которые подраз-

Таблица 7.3.1.

Экранирующая способность некоторых проволочных тканых сеток при углах падения радиоволн от 0 до 60°, в дБ (экспериментальные данные по В. А. Крылову [75])

Характеристика сетки		Длина волны, см													
		3,2		6,3		10,6		35,0		50,0		70,0		100,0	
Номер сетки	Диаметр проволоки, мм	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.	Парал. поляр.	Перпен. поляр.
01	0,07	>40	>40	>40	>40	>40	>40								
02	0,13														
04	0,15														
05	0,22	38...40													
08	0,30	35...40	35...28												
09	0,38	36...40	36...30												
1	0,35	34...40	34...28												
1,25	0,40	30...40	30...23												
2,0	0,50	24...31	24...20	30...36	30...25	35...41	35...29								
2,6	0,50	19...25	19...15	25...31	25...19	30...36	30...23								
1,2	0,35	29...39	20...22	39...46		>40									
1,4	0,35	27...37	27...22	35...42		>40									
1,8	0,35	25...31	25...21	31...37		35...42									
2,5	0,5	25...31	25...21	31...37	31...27	35...41	35...31								
3,2	0,5	15...21	15...12	21...27	21...18	26...32	26...20								
3,2	0,9	19...25	19...16	26...30	24...21	29...36	29...25	>40	>40	>40	>40	>40	>40	>40	>40
3,2	1,1	24...30	24...20	30...36	30...27	34...40	34...30								
5	0,7	9...12	9...6	15...18	15...12	20...22	20...17	30...33	30...22	33...36	33...24	36...39	36...27	39...42	39...32
5	1,4	17...22	17...13	20...26	20...16	27...33	27...23	37...43	37...33	>40	>40	>40	>40	>40	>40
8	0,7	4,5...9	4,5...3	10...15	10...8	13...19	13...10	21...29	21...17	26...32	26...20	30...35	30...20	32...38	32...21
10	0,7			8...14	8...6	11...17	11...8,5	21...28	21...16	25...31	25...20	29...36	29...20	31...37	31...21
14	1,4			5,5...10	5,5...3,5	9...16	8...6,5	19...25	19...16	22...28	22...17	25...31	25...20	28...34	28...20
20	1,4			3,5...7	3,5...2,5	5,5...10	5,5...4	15...20	15...12	17...23	17...13	19...26	19...13	23...30	23...13

Примечания: 1. Слова „параллельная поляризация" и „перпендикулярная поляризация" означают, что плоскость поляризации падающей волны (плоскость вектора $\vec{E}$) соответственно параллельна и перпендикулярна проволокам сетки. 2. В интервалах между ослабления первая цифра относится к углу падения 0°, вторая—60°. 3. Пунктирной линией отделены данные (справа и снизу), которые были получены без соблюдения антенно-дифракционного критерия (рис. 7. 3. 14) и потому их следует считать приближенными. 4. Сетки с номерами 01...20—латунные, ГОСТ 3584—53; с номерами 1,2...10—стальные, ГОСТ 3826—47.

деляются в зависимости от размера стороны ячейки в свету. Приводимая номограмма не учитывает влияния материала сетки, так как материал проволоки практически очень мало влияет на величину создаваемого сеткой ослабления. Поэтому при выборе материала сетки руководствуются, в основном, экономическими соображениями. Рассчитанное на основании номограммы рис. 7.3.3 ослабление сеток находится в хорошем согласии с экспериментом (табл. 7.3.1). Приведенный в таблице материал получен для нормального и косого падения луча.

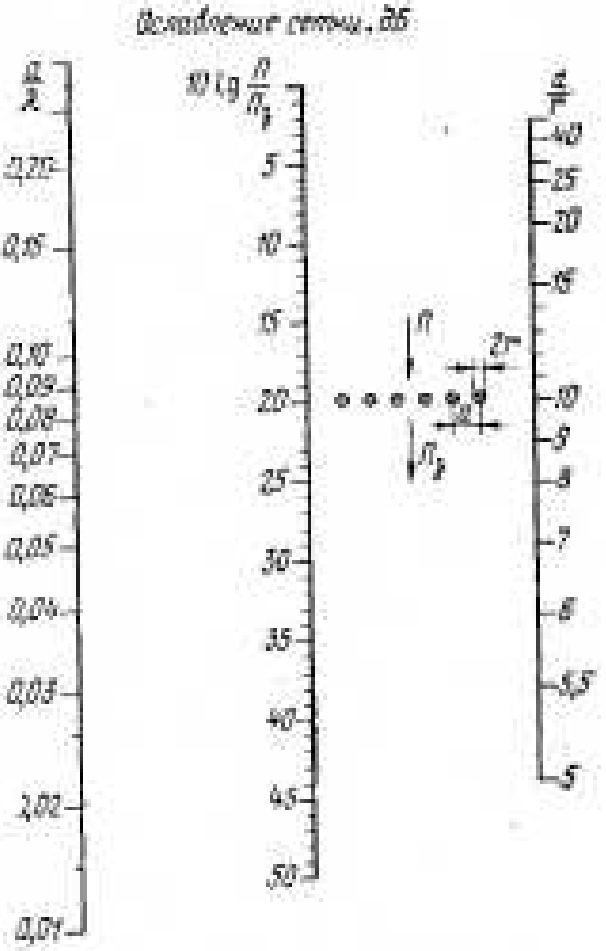


Рис. 7.3.3. Номограмма для расчета ослаблений СВЧ поля металлическими сетками.

По принципу сетчатого экрана построена защитная хлопчатобумажная ткань с микропроводом, в структуре которой тонкие металлические нити образуют сетку. Медная проволока скручена с хлопчатобумажными нитями, которые защищают ее от внешних воздействий и служат изоляцией. Ослабление СВЧ поля такой тканью в диапазоне частот 600...10 000 МГц составляет соответственно от 40 до 20 дБ. Расчет затухания перфорированных металлических листов приведен в п. 7.3.2 (7.3.10).

В новых американских костюмах применяется нейлоновая нить диаметром 0,157 мм, пропитанная серебром. Эти костюмы обеспечивают затухание 18 дБ (вместе со специальной застежкой — молнией).

Радиопоглощающие материалы получили пока малое распространение в технике защиты от СВЧ излучений. Причиной тому, видимо, является значительный вес, относительно высокая стоимость, а также малый ассор-

тимент имеющихся типов РПМ. Примером использования РПМ могут служить антенные насадки, применяемые во время некоторых измерений в качестве аналога свободного пространства антенн; обкладки в местах стыков внутренней поверхности шкафов с генераторной и усилительной СВЧ аппаратурой в виде ферритовых пластин. Пока еще обсуждается целесообразность использования подвесных радиопоглощающих объемов в помещениях, экранированных фольгой или металлическим листом. Подробные описания принципа действия РПМ и их использования можно найти в работе [163]. Основные характеристики некоторых радиопоглощающих материалов приведены в табл. 7.3.2.

Таблица 7.3.2.

Характеристика радиопоглощающих материалов [40]

Наименование материала	Марка	Диапазон волн, см	Коэффициент отражения по мощности, %
Резиновые коврики	В2Ф-2 В2Ф-3 ВКФ-1	0,8 . . . 4	2
Магнитодиэлектрические пластины	ХВ-0,8 ХВ-2,0 ХВ-3,2 ХВ-10,6	0,8 2,0 3,2 10,6	2
Поглощающие покрытия на основе поролона	„Болото" ВРПМ	0,8 и более 3,0 и более	2 . . . 3
Ферритовые пластины	СВЧ-0,68	15 . . . 200	3 . . . 4

7.3.2. Средства индивидуальной защиты. Эти средства используются при проведении ряда работ: ремонте антенных устройств, исследовании поля антенн, некоторых биофизических исследованиях и т. д., когда организация коллективной или локальной долговременной защиты нецелесообразна или невозможна. К средствам индивидуальной защиты относят костюмы, очки, фартуки и т. п.

Радиозащитный костюм в общем случае шьется из хлопчатобумажного материала, вытканного вместе с микропроводом [75]. Шлем и бахилы костюма сделаны из

такой же ткани, но в шлем спереди вшиты очки и специальная проволочная сетка для облегчения дыхания. Индивидуальные средства защиты, в том числе и костюм, рассчитаны на длительную носку и во многих случаях обеспечивают необходимые эксплуатационные качества и заданную степень защиты: на средних частотах СВЧ диапазона до 25...30 дБ. В таком костюме непрерывная работа в течение всего рабочего дня допустима при ППМ до 5 ... 10 мВт/см².

На крайних частотах СВЧ диапазона защитные свойства обычных костюмов снижаются. На высоких частотах это ограничение обусловлено увеличением радиопрозрачности материала костюма из-за увеличения отно-

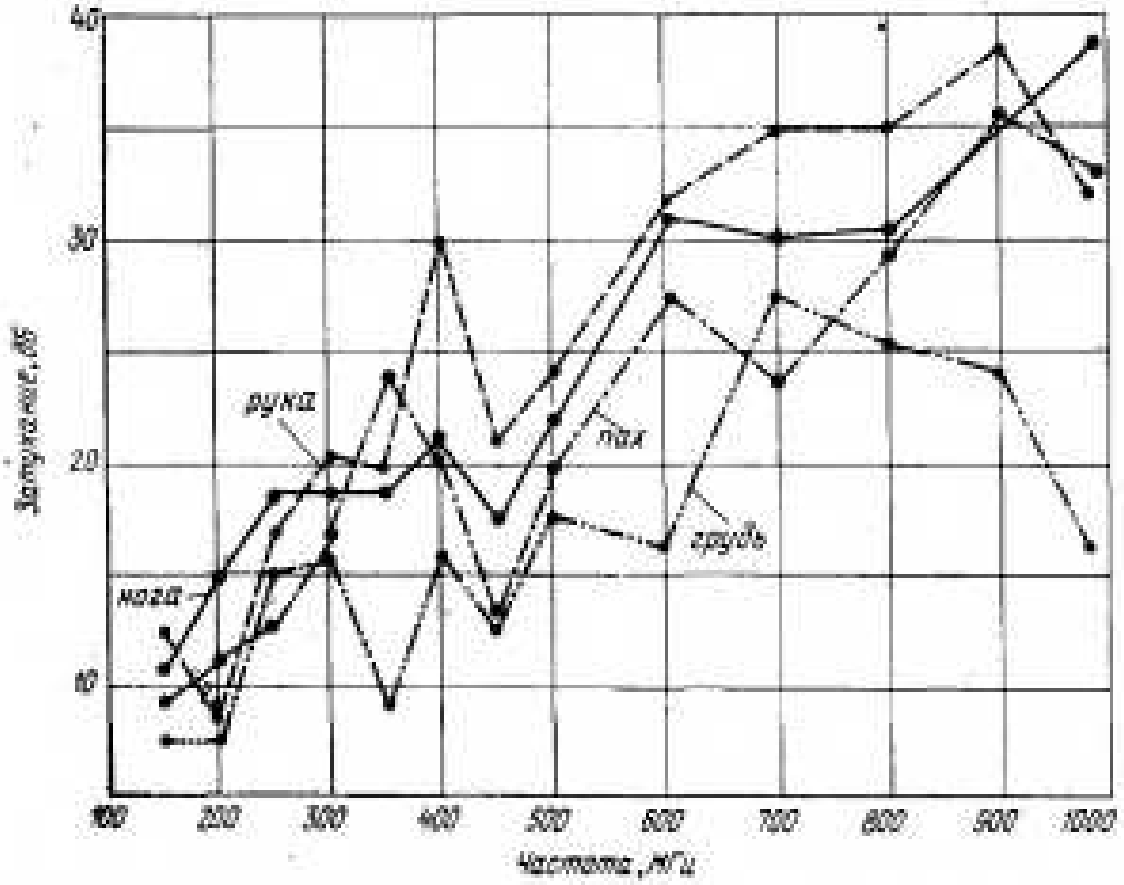


Рис. 7.3.4. Результаты проверки сквозного затухания отдельных элементов радиозащитного костюма одного из распространенных типов.

сительного отверстия ячеек сетки ткани (по отношению к длине волны). Коротковолновая граница находится в пределах нескольких десятков гигагерц. Нижняя граница защитного действия костюма составляет, в соответствии с проведенными измерениями, 300 ... 600 МГц; далее затухание резко падает (рис. 7.3.4). Дело в том,

что при сшивании ткани (в соответствии с выкройкой) не обеспечивается и не может обеспечиваться необходимый контакт эмалированных проводов отдельных деталей одежды на всех частотах. На высших частотах величина емкости между проводами отдельных деталей в швах оказывается достаточной для создания необходимого модуля переходной проводимости; на низких же частотах элементы одежды начинают вести себя как индивидуальные изолированные вибраторы, к тому же теперь соизмеримые с длиной волны. Это определяет резонансный характер изменения величины затухания от частоты.

Сейчас предложена конструкция радиозащитной одежды (с использованием ткани с микропроводом), которая может заменить существующие конструкции костюмов и очков и предназначена для работ во всем диапазоне СВЧ с затуханием, близким к затуханию ткани [98]. Комплект радиозащитной одежды состоит из трех элементов: шлема, куртки и брюк (рис. 7.3.5). Перчатки и бахилы для обычных значений интенсивности радиополя СВЧ оказались фактически ненужными, так как допустимая величина ППМ для рук и ног во много раз выше, чем ППМ при облучении всего тела. Отличительной особенностью костюма является пропитка всех швов электропроводящей массой или клеем.

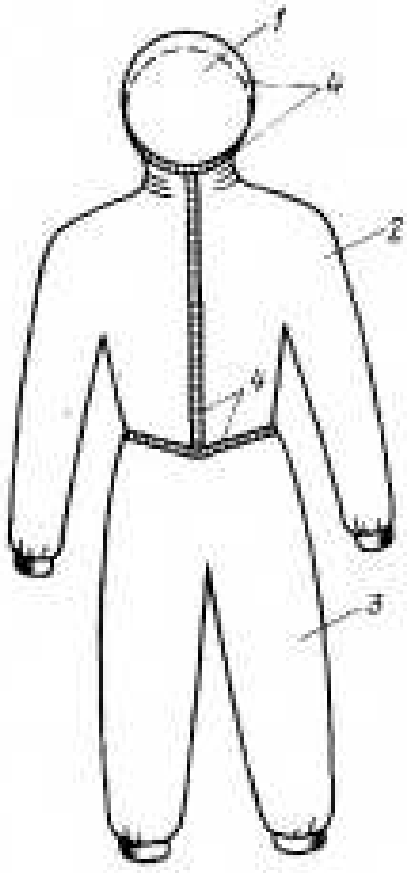


Рис. 7.3.5. Детали радиозащитного костюма:

1 — маска-шлем; *2* — куртка; *3* — брюки; *4* — основные элементы стыковки деталей (застежка типа «Молния»).

Суть использования здесь электропроводящих масс или клеев состоит в следующем. Даже при выполнении швов «внахлест» расстояние между проводами сшиваемых деталей одежды в среднем не меньше половины толщины хлопчатобумажной нити (рис. 7.3.6), а площадь пересечения каждой пары проводов менее квадрата диаметра провода. Поэтому емкость между проводами элементов обычно очень мала, фактически не превышает единиц пикофарад на сантиметр длины шва (на частотах сотни мегагерц это соответствует емкостной проводимость около сотых долей мо). Этим как раз и объясняется снижение экранного затухания всего костюма на низких частотах.

При пропитке швов промежутки между нитями и проводами заполняются проводящей массой (рис. 7.3.7). В некоторых случаях это приводят к гальваническому контакту между проводами

скрепляемых деталей одежды, в особенности если перед пропиткой провода были зачищены от эмали. Однако даже если гальванического контакта и нет, после пропитки резко возрастает емкость между проводами из-за обволакивания их массой. Нетрудно подсчитать, что при обволакивании только половины проводов (на сантиметре длины это порядка 30...60 см провода диаметром 0,05...0,03 мм) при толщине изоляции около 10 мкм емкость шва составляет сотни пикофарад на сантиметр длины, т. е. приблизительно на два порядка больше емкости обычных соединений.

Форма выпускаемых в настоящее время **радиозащитных очков**, носимых отдельно или вшитых в шлем костюма, повторяет классическую форму защитных очков (например, летных). В таких очках используют стекла из специального радиозащитного стекла (стекла, покрытого двуокисью олова), вырезанные приблизительно в виде эллипсов с размерами полуосей около 25×17 мм и вставленные в оправу из поролона с вшитой в него металлической сеткой. Защитные свойства очков оцениваются, как правило, на основании данных о коэффициенте затухания применяемого стекла, равного 25 ... 35 дБ. Эту величину считают вполне достаточной для защиты, однако, как оказалось, она соответствует истинному затуханию очков только в верхнем участке СВЧ диапазона.

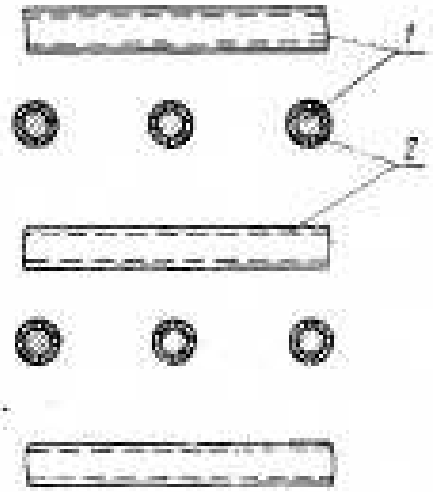


Рис. 7.3.6. Обычное расположение проводов *1*, покрытых эмалевой изоляцией *2*, в местах стыков (швов) деталей одежды. Промежутки заполнены хлопчатобумажными нитями.

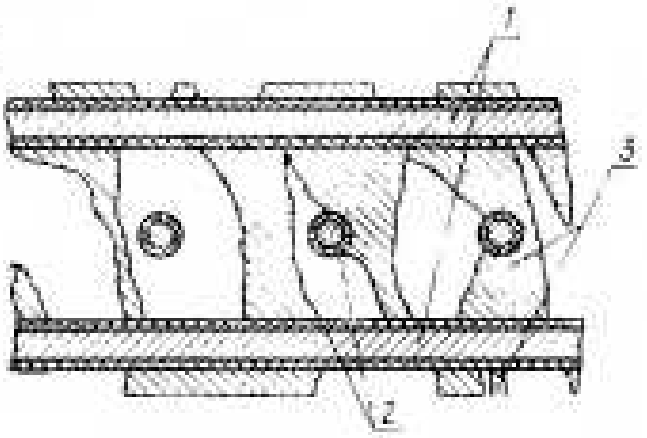


Рис. 7.3.7. Обволакивание проводников *1*, покрытых изоляцией *2*, при проклеивании швов проводящей массой *3*.

Имеется четкая нижняя граница по частоте, где величина затухания падает ниже допустимой величины; существование этой границы обусловлено снижением дифракционного затухания с понижением частоты.

Для расчета дифракционного затухания используем известную зависимость затухания от параметра v (см. п. 5.2.3):

$$v = H_0 \cos\delta \sqrt{(2/\lambda)(1/r + 1/R)} \qquad (7.3.3)$$

где H_0 — превышение кромки экрана над оптической линией источник излучения — расчетная точка; δ — угол между этой линией и перпендикуляром к экрану; r — расстояние экран — расчетная точка; R — расстояние экран — источник излучения.

Для простоты примем $\delta = 0$; $1/R = 0$. Тогда можно записать: $\lambda = 2H^2/v^2 r$, или с учетом аппроксимации $B(v)$ [см. далее (7.3.9)]

$$\lambda = \frac{2H_0^2}{r\,[\text{anti lg}\,0{,}05B - 0{,}65]^2}. \qquad (7.3.4)$$

График зависимости $\lambda(B)$ при $r = 3$ см и $2H_0 = 9$ и 6 см (соответственно с оправой из металлической сетки и без нее) приведен на рис. 7.3.8. Затухание в костной ткани не учтено.

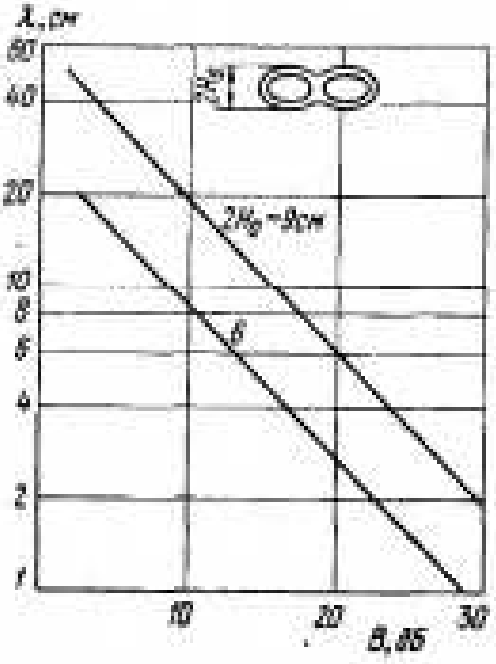


Рис. 7.3.8. Зависимость максимальной рабочей длины волны очков с вертикальным размером 6 и 9 см от требуемого затухания B.

Определим длину волны, при которой среднее гарантируемое затухание (обычно около 30 дБ) снижается в 100 раз, т. е. дифракционное затухание равно 10 дБ. Для существующих типов очков без сетчатой оправы $H_0 \approx 3$ см, $r \approx 3$ см; тогда $\lambda_{10\text{дБ}} \approx 8{,}5$ см. На бо́льших длинах волн затухание снижается до величины ниже 10 дБ (учет закругления экрана, «неметалличности» кромки и влияния тела человека существенно результа-

тов не изменит). Таким образом, рекомендуемая конструкция очков позволяет осуществлять более или менее удовлетворительную защиту (до 10 дБ) на частотах выше 3 ГГц. На частотах ниже 1... 2 ГГц они фактически бесполезны. Более того, ношение очков в ряде случаев может привести к вредным последствиям из-за необоснованной уверенности в их защитных свойствах. Отсутствие в литературе данных о диапазонных свойствах очков можно объяснить, по-видимому, сложностью проведения необходимых измерений.

Существенным недостатком принятой в настоящее время для производства конструкции очков является явное неудобство их носки. Одно из известных предложений заключается в замене существующих типов радиоочков специальной защитной маской, изготовленной из оргстекла или другого светопрозрачного материала, в том числе из ударопрочного стекла, удовлетворяющего определенным механическим и гигиеническим требованиям и покрытого (например, методом напыления) металлической пленкой (алюминий или др.) или пленкой из окислов металлов (типа SnO_2) с высокой поверхностной проводимостью. Пленка наносится непрерывно, если технология позволяет обеспечить при заданном радиозатухании (15...30 дБ) необходимую светопрозрачность, или в виде сетки с заданными размерами ячеек. Форма и размер маски (рис. 7.3.9), предназначенной для самостоятельного использования, выбираются такими, чтобы величина дифракционного затухания на уровне глаз была бы по крайней мере не меньше затухания пленки, которое можно достаточно легко получить равным 20...30 дБ.

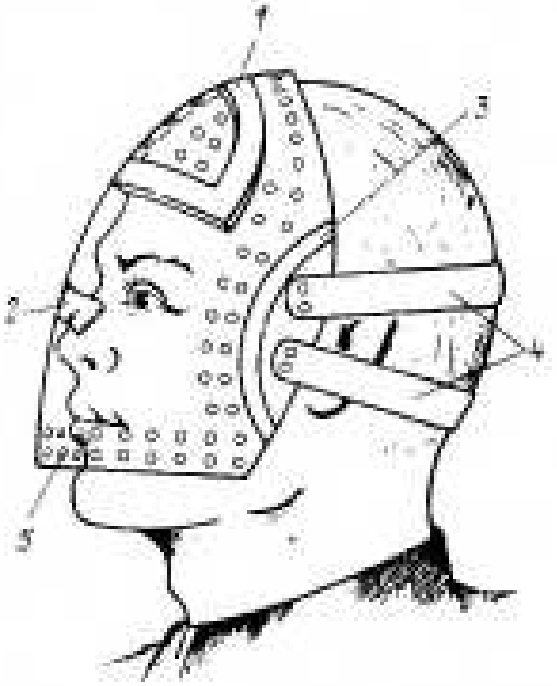


Рис. 7.3.9. Защитная маска с перфорационными отверстиями

Кроме того, форма маски выбирается такой, чтобы обеспечивалась удобная посадка и возможность встраивания в костюм. На месте механического контакта маски со лбом, висками и спинкой носа навленвается мягкий поролон *1*, *2* и *3*; выбор этих точек контакта определяется удобством крепления маски к голове с помощью затылочных гибких ремней или резиновых лент *4*. Кроме жесткости положения маски при обычных положениях головы и мягкости контакта с носом, конструкция узла *2* должна обеспечивать достаточный обзор.

Выбор в качестве материала для штамповки маски обычных термопластических масс упрощает задачу создания необходимой

формы маски и выработки отдельных фигурных деформаций для создания определенных эксплуатационных удобств. Кроме того, это позволяет создать простую конструкцию вентиляционных отверстий для дыхания и теплообмена поверхности тела. Для этого боковые, нижняя и верхняя части маски выполняются перфорированными. Конструкция перфорационных отверстий b должна удовлетворять определенным условиям, обеспечивающим необходимый минимум дополнительного ослабления экранировки. Выбор размера перфораций и расстояний между ними может быть приближенно произведен на основании номограммы (рис. 7.3.10). Для повышения зату-

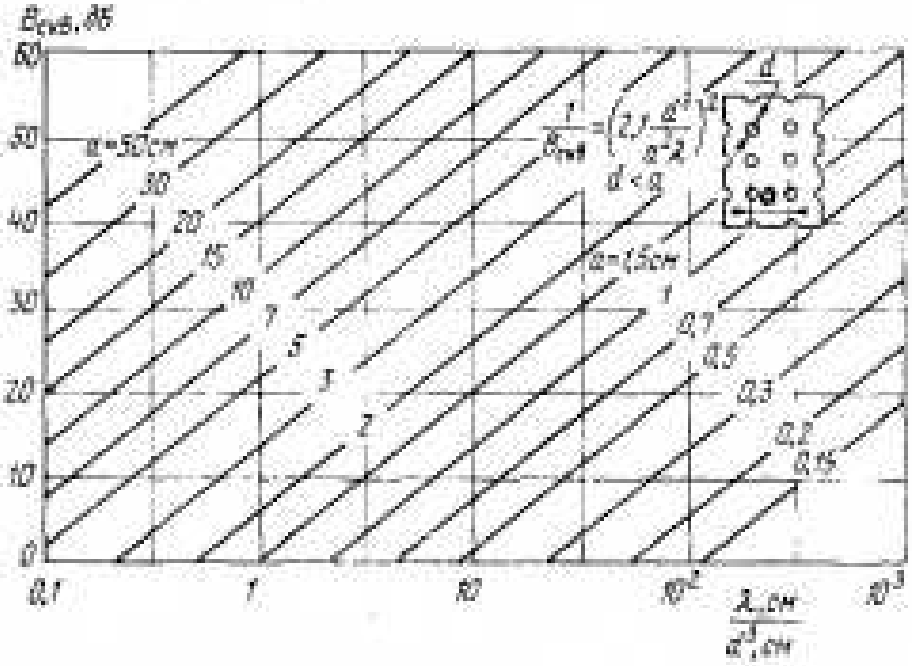


Рис. 7.3.10. Номограмма для расчета ослабления перфорированных металлических листов (a — расстояние между отверстиями).

хания перфораций желательно применять напыление отверстий изнутри, т. е. по всей толщине материала маски. В этом случае затухание, вносимое этими отверстиями, можно определить по формуле затухания решетки запредельных круглых отверстий:

$$B = \frac{54,58}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{кр}}{\lambda}\right)^2}, \qquad (7.3.5)$$

где B — затухание одного отверстия, в децибелах на сантиметр длины; $\lambda_{кр} = 3,14\ d/2$ — критическая волна для данного типа волн, худший случай — волна H_{11} (d — диаметр волновода).

Если примем естественный случай $\lambda \gg d$, можно записать простое выражение для максимального размера круглого отверстия:

$$d_{макс} = 3,18/B, \qquad (7.3.6)$$

при этом, так как нас интересует случай, когда расчетная точка находится на расстоянии от выходной апертуры отверстия $r \gg d$, величина затухания слабо зависит от количества отверстий. Для

толщины материала маски $\Delta=0{,}3$ см и при допущении полного затухания $B_{полн}=20$ дБ, т. е. $B=67$ дБ/см, величина $d=0{,}48$ см, что оказывается технологически вполне выполнимым.

Другим из возможных способов защиты головы является применение шлема, вышитого из металлической сетки в виде двух масок, скрепляемых вместе после одевания. Сетчатый шлем удобнее и легче маски, однако он менее эстетичен и требует большего времени для одевания.

К индивидуальным средствам защиты могут быть отнесены **ширмы и занавеси** из радиозащитной ткани. Они устанавливаются там, где проводятся в поле СВЧ временные работы (например, регламентные, ремонтные и т. д.). Защитные свойства ширм и занавесей ограничены дифракцией, и потому они оказываются эффективными только в верхнем участке СВЧ диапазона. Несомненным достоинством ширм и занавесей является то, что они практически не стесняют движений защищаемого и просты в изготовлении.

7.3.3. Проверка экранирующих свойств материалов и изделий. На практике, в том числе и при измерении экранных свойств средств защиты, приходится четко разграничивать защитные свойства материалов и изделий из них. Основными причинами этого являются, во-первых, различия радиочастотных свойств стыков и различного рода конструктивных элементов от свойств материалов, а во-вторых, наличие неизбежных в конструкциях складок, неровностей, изгибов, близких или кратных длине волны облучающего поля, способствующих, таким образом, появлению определенных резонансных эффектов. Естественно, если исключить из рассмотрения эти эффекты можно сказать, что сквозное затухание сплошного листа (отрезка) материала всегда больше сквозного затухания этого материала в конструкции, и в практических работах это всегда приходится учитывать.

Большинство методов измерения рассчитано на определение экранных свойств материалов и лишь некоторые из них пригодны для оценки затухания конструктивных элементов изделия в целом.

Одним из методов оценки сквозного затухания пленочных материалов (полупроводящих) является измерение поверхностного сопротивления пленки с помощью моста постоянного тока. Однако из-за скин-эффекта этот метод применим только для тонкопленочных покрытий, и в технике защиты на СВЧ его применение весьма ограничено.

Большое распространение получили устройства измерения экранного затухания материалов и элементов изделий непосредственно на рабочих частотах. Основными элементами этих устройств являются: генераторы, датчики (антенны) и измерители мощности СВЧ, точнее, измерители отношений мощностей. Во всех случаях материал помещают между передающей и приемной

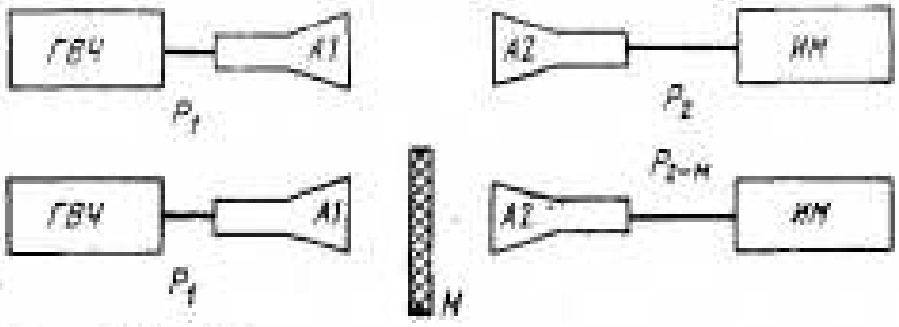


Рис. 7.3.11. Обычная схема измерения сквозного затухания материалов:
ГВЧ — генератор; *М* — материал; *ИМ* — измеритель мощности; *A1* и *A2* — передающая и приемная антенны, $\beta_{сквз} = 10 \lg \frac{P_2}{P_{2-м}}$

антеннами и измеряют уменьшение мощности сигнала на выходе приемной антенны по сравнению с мощностью без экранирующего материала (рис. 7.3.11). Затухание обычно определяется в децибелах. Мощность генератора и чувствительность измерительного устройства определяют пределы измеряемых затуханий и динамический диапазон работы устройства.

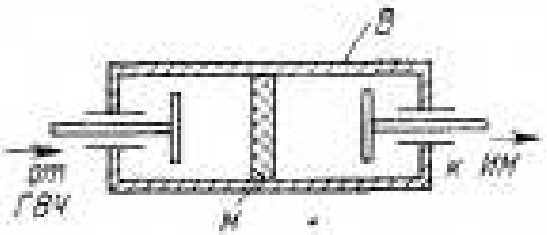


Рис. 7.3.12. Волноводный метод измерения сквозного затухания (*В* — волновод, *М* — материал).

Из классических методов определения экранного затухания материалов хорошо известны два: волноводный и антенный. В первом из них материал помещается в волновод (рис. 7.3.12). Недостатки этого метода очевидны: необходимость тщательной подгонки образца по размерам волновода и узкополосность. Смена волноводов сложна и обходится довольно дорого. Особенность работы с волноводами заключается в том, что при необходимости проведения измерений на частоте f и при наличии генераторов только более низкой частоты $f_г < f$

можно воспользоваться волноводами (рупорами), имеющими размеры, соответственные частоте f. Измерения с помощью таких волноводов, подключенных к выходу более низкочастотных генераторов СВЧ, будут возможны за счет высокого содержания гармоник обычных генераторов. Естественно, такие измерения можно проводить только чувствительными приемниками (супергетеродинными).

При использовании антенного метода антенны размещены на расстоянии $2R \approx 4L^2/\lambda$, а посередине между ними помещается лист исследуемого материала (рис. 7.3.13). Как и волноводный, этот метод является

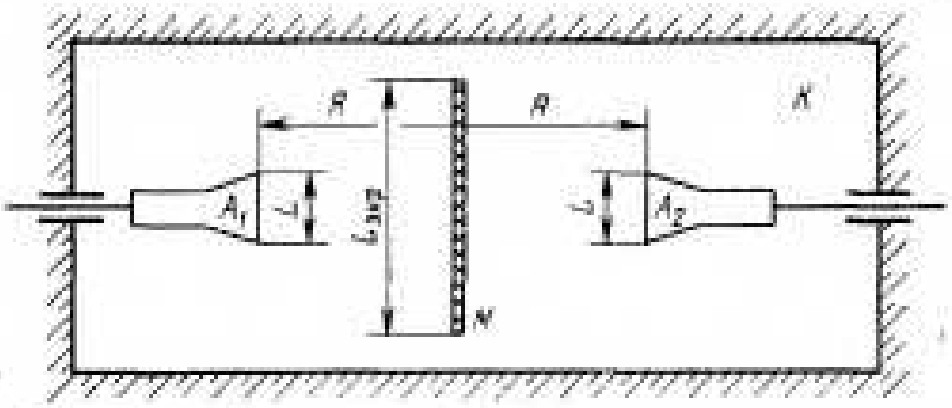


Рис. 7.3.13. Антенный метод измерения сквозного материала:

Обычные соотношения: $L_{экр} = (2 \ldots 5)R$, $R = 2L^2/\lambda$. Измерения как правило проводятся в заглушенной камере K (в помещении, покрытом радиопоглощающим материалом).

узкополосным, но материалы не приходится подгонять точно по определенному размеру, поэтому может исследоваться бо́льший класс материалов, чем в волноводах (например, стеклоблоки, кирпичные стены и т. п.). Кроме необходимости соблюдать неравенство

$$R \geqslant 2L^2/\lambda, \qquad (7.3.7)$$

следует иметь в виду *возможность искажения результатов из-за влияния энергии поля, дифрагировавшего на кромках экрана*. На этом следует остановиться подробнее. Сначала заметим, что поле дифракции тем более заметно влияет на общий результат, чем большим сквозным затуханием обладает экран и чем более жесткие требования мы предъявляем к точности измерений, т. е.

$$B_{изм} \leqslant |B| - B_{ош} - B_{интерф} + B_{диагр}. \qquad (7.3.8)$$

где $B_{изм}$ — предполагаемое ослабление экрана; B — затухание дифрагировавшего поля; $B_{доп}$ — дополнительное затухание, требуемое для уменьшения ошибок до необходимого минимума; $B_{интерф}$ — дополнительное дифракционное затухание, необходимое для компенсации эффекта суммирования волн за экраном при дифракции на четырех кромках экрана, $B_{диагр}$ — ослабление поля дифракции реальной диаграммой антенны-зонда (все B в дБ).

Принимая $B_{доп}=10$ дБ, $B_{диагр}=10$ дБ и имея в виду, что прямую ветвь зависимости $B(\lg v)$ (рис. 5.2.7) можно аппроксимировать линейной зависимостью $B[\text{дБ}]\approx 20\lg v+13$, запишем обязательное условие

$$B_{изм}\leqslant 20\lg v+B', \qquad (7.3.9)$$

где $B'=13-10+10-B_{интерф}$.

В соответствии с принятыми обозначениями (см. п. 5.2.3), $v=H_0\cos\delta\sqrt{(2/\lambda)(1/R_1+1/R_2)}$, обозначая длину экрана через $L_{экр}$, и имея в виду случай, когда волна падает на экран нормально, принимая $R_2\longrightarrow\infty$ (т. е. рассматривая картину поля с одной стороны экрана), получаем, считая $R_1=R$:

$$v=L_{экр}/2\sqrt{2/R\lambda} \qquad (7.3.10)$$

и

$$B_{изм}[\text{дБ}]\leqslant 20\lg\left[\frac{L_{экр}}{2}\sqrt{\frac{2}{R\lambda}}\right]+B'. \qquad (7.3.11)$$

После сведения выражений (7.3.7) и (7.3.11) получим *антенно-дифракционный критерий* — двухстороннее условие, обязательное для выполнения при измерениях сквозного затухания экранов:

$$2L^2\leqslant\lambda\cdot R\leqslant\frac{L_{экр}^2}{2\left|\text{anti}\lg\frac{B_{изм}-B'}{20}\right|^2}. \qquad (7.3.12)$$

При использовании неодинаковых антенн оно должно выполняться по крайней мере для меньшей из них (при этом предполагается, что переотражение энергии стенами отсутствует).

Значения B' выбираются так: при равномерном облучении экрана с большого расстояния $B_{интерф}=12$ и $B'=+1$ дБ. Этот случай в экспериментальной практике

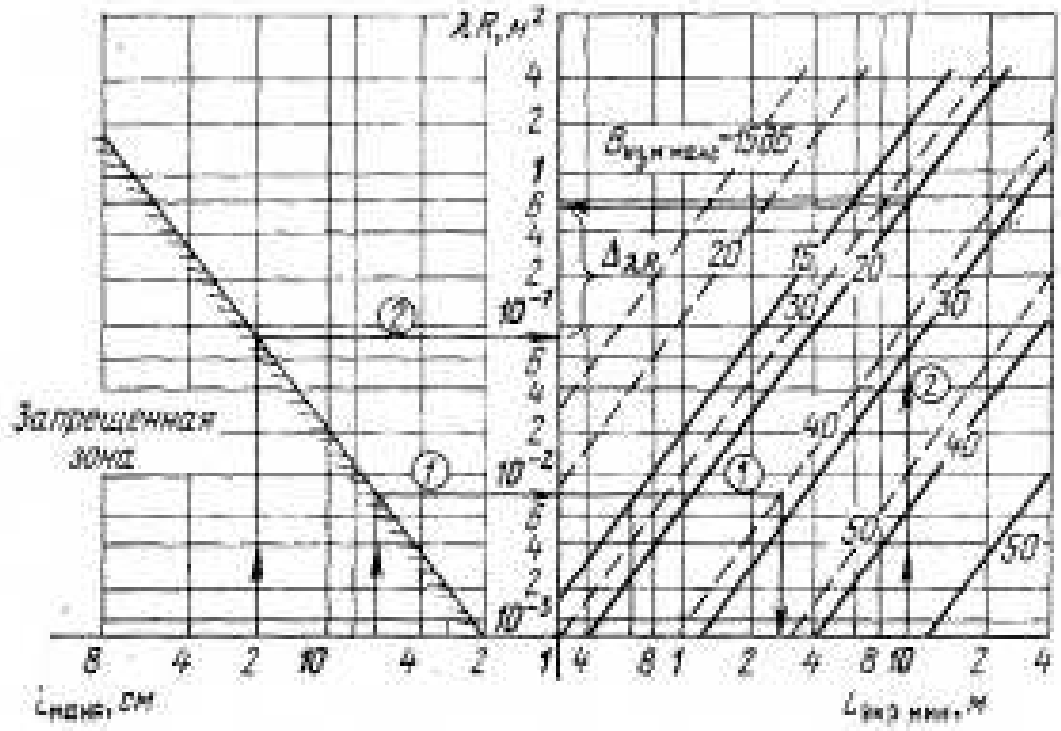


Рис. 7.3.14. Графическое представление антенно-дифракционного критерия для оценки условий измерения сквозного затухания экранов:
——— дальнее облучение, — — — ближнее облучение.

довольно редкий. Обычно при облучении с ближнего расстояния концы экрана освещаются намного меньше, чем центр. Кроме того, создается дополнительное затухание из-за косого падения луча на кромку со стороны облучателя. Поэтому для обычных условий можно принять $B_{\text{интерф}}=0$, тогда $B'=13$ дБ.

Условие (7.3.12) может быть легко представлено графически (рис. 7.3.14). График позволяет по любым трем из пяти параметров λ, l, B, R и $l_{\text{экр}}$ найти два неизвестных.

Пример 1. Ближнее облучение.

Задано: размер антенны $L=0{,}06$ м; ожидаемое затухание $B_{\text{изм макс}}=40$ дБ; длина волны $\lambda=0{,}1$ м.

Ответ: минимальное расстояние $R=0{,}08$ м; минимальный размер экрана $L_{\text{экр}}=2{,}8$ м.

Пример 2. Дальнее облучение.

Задано: $L=0{,}2$ м, $B_{\text{изм макс}}=20$ дБ; $L_{\text{экр}}=10$ м, $\lambda=0{,}1$ м.

Ответ: антенну можно устанавливать на расстояниях 0,8...5,5 м.

Если исключить влияние дифрагировавшего поля, внешних предметов и операторов, точность измерения сквозного затухания по этому методу оказывается достаточной для всех практических целей. Между тем, это

не всегда удается. Далеко не всегда также оказывается возможным ограничиться измерениями на двух-трех дискретных частотах, поэтому за последнее время разработаны новые методы измерения сквозного затухания с применением широкополосных биспиральных антенн (типа описанных в п. 6.1.5), помещенных в открытые с одной стороны металлические полости, заполненные радиопоглощающим материалом. В отличие от таких же антенных узлов, применяемых в интенсиметрах, здесь они со стороны раскрыва загрублены пленочным аттенюатором. Это позволяет обе антенны располагать в непосредственной близости от испытуемого образца. Весь антенный узел может работать в диапазоне от 0,15...0,3 до 2...3 ГГц. Динамический диапазон ограничен здесь только паразитными связями антенн и шумами приемника и при тщательном выполнении экранировки трактов достигает 70...100 дБ.

Все приведенные выше методы пригодны для измерения защитных свойств фактически только материалов и уж, конечно, непригодны для измерения таких изделий, как костюм или халат. Для этих целей можно использовать совместно антенну-зонд, помещаемую внутрь исследуемого объема, и логопериодическую антенну, работающую на прием — рис. 7.3.15 (применение высокоэффективной антенны снижает до минимума влияние антенного эффекта соединительных кабелей). Этот способ позволяет оценить радиозащитные свойства конструкций самых различных конфигураций. Графики, приведенные на рис. 7.3.4, были сняты именно так.

Таковы вкратце методы измерения экранного затухания. Измерители мощности, которые применяются в измерениях, не имеют принципиального значения, и поэтому мы их здесь описывать не будем. Отметим лишь, что простейшие из них — измерители детекторного типа с наводкой, т.е. с отсчетом по аттенюатору СВЧ, включенному до детектора — обычно используются с усилителем низкой частоты типа У2-1А, дополненным для удобства работы и повышения чувствительности осциллографом (рис. 7.3.15). Динамический диапазон таких устройств достигает 40...60 дБ; во многих случаях это оказывается вполне достаточным.

Измерительные приемники и тем более устройства калибровки аттенюаторов позволяют измерять затухание в динамическом диапазоне до 90...110 дБ, во мно-

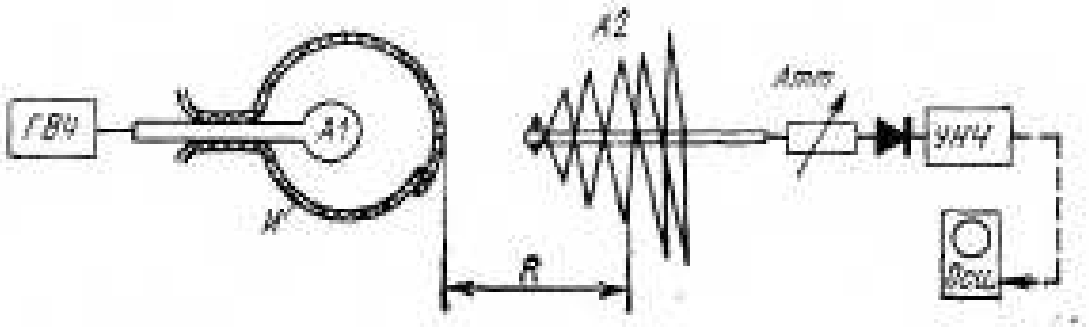


Рис. 7.3.15. Схема установки, пригодной для измерения сквозного затухания таких изделий, как радиозащитные костюмы и т. п. *ГВЧ* — генератор с модуляцией; *А1* — малогабаритная антенна — зонд; *И* — проверяемое изделие; *А2* — высокоэффективная антенна; *Атт* — отсчетный аттенюатор СВЧ; *Д* — детектор; *Осц* — осциллограф. Расстояние *R* до активного на рабочей частоте вибратора антенны *А2* определяется соотношением (7.3.7).

гих из них имеется режим автоматической настройки по уровню. Точность отсчета в них достигает долей децибела (тогда как по отсчетным аттенюаторам обычного типа — лишь 1 ... 2 дБ). Однако они громоздки, требуют применения двух генераторов (сигнала и гетеродина), которые из-за обычного ухода частоты приходится регулярно подстраивать.

7.4. НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЙ. СОПУТСТВУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

В этом параграфе мы рассмотрим вкратце организационные методы защиты, достаточные в некоторых случаях для обеспечения безопасности и без применения инженерно-технических методов, как правило, более сложных и более дорогих. Организационные методы защиты предполагают учет всех вредных факторов, с которыми приходится сталкиваться человеку на современных РТС, в частности шумов, рентгеновских излучений и т. д. Каждый из этих факторов здесь рассмотрен лишь вкратце: с ними можно ознакомиться полнее по литературным источникам, на которые делаются ссылки в соответствующих местах.

В этом же параграфе, завершающем наше рассмотрение методов и средств защиты, мы вкратце разберем возможность оценки эффективности защитных мероприятий по их технико-экономическим параметрам.

7.4.1. Организационные мероприятия. Организационные методы защиты в зависимости от конкретных воз-

можностей применяют «с трех сторон»: у излучателя, у защищаемого объекта (людей) и по пути распространения. Часто их классифицируют следующим образом.

1. Ограничение работы станций по времени, а иногда и по углу места и азимуту, что является, как показывает опыт, вполне реальным путем защиты для многих типов излучающих устройств СВЧ. Такое ограничение может быть выполнено уменьшением времени настроечных, юстировочных и тому подобных работ, проводимых при излучении в эфир. Расчет необходимых углов подъема диаграмм и антенн, обеспечивающих минимальную интенсивность поля в направлении возможного нахождения людей, уже рассмотрен выше (в п. 7.2.3).

2. Выбор рационального взаимного расположения радиотехнических средств, защищаемых объектов и естественных средств защиты (см. § 7.1., п. п. 7.2.1 и 7.2.2).

3. Исключение или ограничение облучения персонала станций и лиц-непрофессионалов за счет следующих мер:

— рациональная организация труда; она обеспечивает минимизацию степени опасности вследствие перераспределения времени облучения между одинаковыми бригадами (исполнителями), позволяет довести время облучения до необходимого нормативного значения, если снизить ППМ инженерно-техническими методами не удается. Общее ограничение времени работы возможно в том случае, когда, например, работы могут проводиться в ночные или утренние часы при неработающей станции (если такое нарушение обычного для человека режима работы практикуется регулярно, необходимо введение на производстве системы специального медицинского контроля);

— проведение инструктажа о правилах техники безопасности при работе в поле СВЧ; кроме регулярного (обычно один раз в квартал) инструктажа о мерах по обеспечению безопасности, часто применяют средства наглядного предупреждения: вывешивают плакаты и правила с кратким перечнем основных мер предосторожности.

7.4.2. Основные сопутствующие факторы на РТС СВЧ. На РТС СВЧ, помимо специфических вредных воздействий, очень часто наблюдаются и так называемые со-

путствующие, в значительной степени влияющие на общие санитарно-гигиенические условия труда. На различных типах РТС СВЧ комбинации сопутствующих факторов чрезвычайно многообразны, так что на организм человека воздействует, как правило, одновременно два-три и более факторов. Таким образом, речь может идти о комбинированном воздействии. К числу наиболее действенных факторов, снижающих работоспособность и вызывающих изменения в организме человека, относятся акустические шумы, неблагоприятные условия микроклимата, рентгеновское излучение, измененный газовый и ионный состав воздуха, электростатические поля, запыленность воздушной среды, в ряде случаев круглосуточная искусственная освещенность помещений.

Общеизвестно вредное действие акустического шума на организм. При воздействии мощных шумов на человека страдает не только и не столько орган слуха (снижение остроты слуха и в дальнейшем появление глухоты), а главное, нервная система, особенно ее высшие отделы, сердечно-сосудистая, эндокринная и ряд других систем *. В помещениях РТС, в которых непосредственно размещены генераторы СВЧ и находится обслуживающий персонал, источниками акустических шумов могут явиться специальное технологическое оборудование, а также системы общеобменной и технологической вентиляции. Шумы могут проникать из соседних помещений, вентиляционных камер, турбовоздуходувок и пр. Уровни акустических шумов в генераторных помещениях, как правило, составляют от 75 до 95 дБ в основном низкочастотного (до 300 Гц) и среднечастотного (300 . . . 800 Гц) диапазона.

---

* По данным американских статистиков, шум в городах возрастает приблизительно на 1 дБ в год [160]; австрийские ученые считают, что шум — одна из основных причин преждевременного старения и сокращения жизни (на 8 . . . 10 лет). Поэтому борьбе с шумом уделяется сейчас очень большое внимание. Например, в СССР в крупных городах уже давно запрещена подача сигналов автомобильным транспортом; при проектировании зданий предусматривается специальная звукозащита стен и потолков и т. д. Во Львове установлен специальный знак «УТ» («Уважай тишину»). В Хельсинки не только запрещена подача сигналов, но беспощадно карается даже хлопанье дверцами автомобилей. Люди на улицах, покупатели и продавцы в магазинах разговаривают вполголоса. В Швейцарии создана Федеральная комиссия по борьбе с шумом из 52 специалистов. Изучаются основные медицинские, акустические и технические аспекты проблемы борьбы с шумом.

При работе в шумной обстановке уже при интенсивности шума 65...75 дБ наблюдаются значительное понижение внимания и ослабление памяти. При интенсивности шума 80...90 дБ нарушается взаимосвязь коры головного мозга с внутренними органами и на этой основе возникают функциональные изменения в деятельности отдельных органов и систем. Отмечено, что биологическое действие шума зависит не только от его интенсивности, но и от спектра. Рядом исследователей выявлено более выраженное действие высокочастотных шумов (800 Гц и выше): звенящие, шипящие, свистящие шумы. Обычные уровни акустического шума (в дБ) приведены ниже.

Шелест травы	10
Шепот, карманные часы	20
Нормальный разговор	40
Движение	
легкового автомобиля	66 . . . 86
троллейбуса	66 . . . 76
трамвая	75 . . . 90
вагонов метрополитена	80 . . . 90
Шум	
в ткацких цехах	87 . . . 110
в лесопильных	96 . . . 100
при испытании двигателей самолета	140
при котором появляется:	
усталость металлов	180
вырывание заклепок из металла	190

В табл. 7.4.1 представлены допустимые уровни шума на рабочих местах.

Помещения большинства РТС СВЧ из-за практически полного отсутствия в технологических помещениях звукопоглощающих объемов имеют очень большую гулкость, которая оценивается временем реверберации — временем, за которое уровень звукового давления в помещении за счет многократных переотражений снизится на 60 дБ после внезапного выключения источника шума. Ввиду того, что в ряде технологических помещений это время составляет несколько секунд, резко ухудшается разборчивость речи, повышается интегральный уровень шума в помещении. Особенно неприятна повышенная гулкость в операторных, управленческих помещениях.

Проведенные за последние годы исследования по изучению влияния шума на организм позволили разработать более обоснованные гигиенические нормативы. В вышедших в 1969 г. «Санитарных нормах и правилах по ограничению шума» [132], отражающих общее профилактическое направление отечественной медицинской науки, выражена тенденция к дальнейшему неукоснительному снижению допустимых уровней воздействующих шумов, к обязательному учету его спектра и главное — к более детальному учету в огра-

Таблица 7.4.1

Допустимые уровни шума на рабочих местах

Рабочие места	Уровни шума, дБ·А
Территория жилой застройки в городском районе в 2 м от жилых зданий	40
Помещения для умственной работы без источников шума (кабинеты, КБ, комната расчетчиков и программистов, лаборатории для теоретических работ)	50
Помещения, требующие разборчивой речевой связи и связи по телефону (диспетчерские пункты, пульты управлений, узлы телефонной связи).	55
Помещения конторского труда с источниками шума (пишущие машинки, счетные машинки, коммутаторы)	60
Помещения пультов, кабин наблюдения и дистанционного управления, не требующие речевой связи	65
Лабораторные помещения с источниками шума, а также помещения шумовых счетно-вычислительных машин (машин цифропечати, табуляторов, магнитных барабанов)	75
Рабочие места в производственных помещениях	85

нию времени его воздействия. Желание автоматизировать процесс учета времени при оценке воздействующих на человека шумов привело в последнее время к появлению нового подхода в оценке акустических шумов [122, 123, 149].

Речь идет о так называемом интегральном подходе, который в отношении радиошумов известен как «дозный» (см. — п. 3.2.2). Этот подход устанавливает жесткую количественную связь между уровнями воздействующей звуковой энергии, временем их действия и вызываемыми биологическими эффектами. При дальнейшем его развитии это направление, видимо, сможет дать новый материал для разработки практических вопросов нормирования, измерения и защиты. К настоящему времени разработан экспозиметр шума, позволяющий учитывать общую за определенный период времени величину воздействующей звуковой энергии как индивидуально на каждого работающего, так и в любом месте производственного помещения [95].

Внедрение интегральных экспозиметров в практику позволит упростить и объективизировать оценку биологического действия шумов на производстве и в быту. Пока для измерения уровня шумов и анализа его спектральной характеристики применяются шумомеры и частотные анализаторы. Существующие нормы по шуму установлены с учетом физиологического значения спектра шумов.

Общая оценка шумов ведется по уровням (в децибелах) среднеквадратичного звукового давления в полосах частот со среднегеометрическими значениями гра-

ниц 63, 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000, 8 000 Гц («октавные» полосы). Для полного измерения уровней звукового давления в октавных полосах частот необходимо применять анализатор и шумомер, включенный на линейную частотную характеристику (в шумомерах шкала С). Для ориентировочной оценки допускается измерение общего уровня шума без анализатора, но в таком случае измерения проводятся по шкале А шумомера (табл. 7.4.1). При измерении по шкале А применяется специально скорректированная частотная характеристика шумомера с учетом особенностей физиологического восприятия шума человеком.

Методы защиты от шума условно можно разделить на коллективные и индивидуальные. К первым относят: устранение причины шума или ослабление его в самом источнике образования (в процессе проектирования, конструирования и эксплуатации оборудования); изоляция источника шума от окружающей среды средствами звукоэкранирования и звукопоглощения; применение рациональной планировки помещений и цехов; уменьшение плотности звуковой энергии отраженных звуковых волн (уменьшение реверберации) путем нанесения на внутренние поверхности звукопоглощающих матов, панелей, плит. Среди индивидуальных средств защиты распространены различного вида антифоны (наушники, шлемы, ватные шарики, вкладыши различной формы) [110].

На некоторых типах РТС могут встречаться импульсные шумы большой интенсивности. Они вредны для человека тем, что за тысячные доли секунды, обычно неожиданно, интенсивность звука нарастает до максимальной величины (130 ... 140 дБ). Это может повлечь за собой кровоизлияние в барабанную перепонку и даже травму уха. Предложен оригинальный способ защиты человека от ударных шумов; ухо человека подготавливают к предстоящему испытанию, предварительно подавая короткий звуковой импульс — «щелчок» или плавно нарастающий сигнал, достигающий максимума (100 дБ) в момент акустического удара [20, 21].

Среди других факторов внешней среды РТС СВЧ, влияющих на организм человека, большую роль играют метеорологические. Микроклимат помещений (температура, влажность, скорость движения воздуха, средняя радиационная температура), учитывая многообразие типов РТС, режимы их работы, расположение во всех климатических зонах, варьируется в больших пределах, поэтому

говорить о каких-либо общих или свойственных большинству стационарных параметрах микроклимата не приходится.

Например, **температура воздуха** в кабинах подвижных средств колеблется в летний период в средней климатической полосе от 18...20 °С до 25...30 °С и выше. В южных районах она летом достигает 35...37 °С. Относительная влажность может колебаться от 20...25% до 75...80%. Большое значение в подвижных РТС в общем суммарном тепловом действии микроклимата имеет средняя радиационная температура, т. е. суммарная интенсивность излучения различных ограждающих поверхностей. Так, в теплый период года средняя радиационная температура в кабинах РТС превышает температуру воздуха на 5...6 °С и более. Подвижность воздуха составляет от 0,01 до 1,5...2 м/с. Микроклимат стационарных РТС СВЧ отличается относительной стабильностью, отсутствием столь больших перепадов температуры, влажности и подвижности воздуха. Неблагоприятные микроклиматические факторы обусловливают многие заболевания обслуживающего персонала, особенно простудного характера, и нормализация микроклимата имеет большое значение.

Некоторые специфические технологические процессы в генераторных помещениях РТС (например, искровые разряды на модуляторных трубках и т. п.), широкое использование в качестве покрытия синтетических полимерных материалов с высокими диэлектрическими свойствами — приводят к изменению **ионного состава воздуха** помещений и к увеличению числа наблюдаемых случаев электризации. Накопление электрических зарядов нередко сопровождается искровыми разрядами. Биологическое влияние электризации и статических электрических полей становится сейчас предметом биофизических и гигиенических исследований, при этом обычно рассматривается комплекс воздействий: влияние электростатического поля, электризации и разрядного тока. В помещениях РТС изменяется ионный состав воздуха, увеличивается как общее число заряженных частиц, так и количество вредодействующих положительных ионов, уменьшается число отрицательных легких ионов, обладающих, как известно, благотворным действием на организм [159]. Нередки случаи внезапных искровых разрядов при соприкосновении людей с металлическими покрытиями шкафов, что обычно сопровождается отрицательными эмоциями.

Газовый состав в помещениях, генераторных и аппаратных залах РТС нередко отличается от атмосферного, однако эти изменения, как правило, незначительны и не выходят за пределы санитарно-гигиенических норм. Иногда, например, отмечается в ряде случаев некоторое повышение содержания CO_2, что может явиться результатом жизнедеятельности обслуживающего персонала при недостаточном объеме и слабой вентиляции помещений. К другим сопутствующим вредным факторам современных РТС СВЧ, можно отнести вибрации, возникающие при работе некоторых машин и механизмов (например, при вращении антенн и т. п.). Биологическое действие вибрации в значительной мере зависит от ее амплитуды, продолжительности воздействия и, главное, от частоты. Влияние вибрации может выражаться в головной боли, головокружении, в чувстве общей «разбитости» и т. д.

На некоторых типах современных РТС СВЧ обслуживающий персонал вынужден все свое рабочее время находиться в условиях **искусственного освещения** лампами дневного света или лампами накаливания. Отсутствие в их спектре биологически активной ультра-

фиолетовой части при длительном, многомесячном действии может привести организм человека к ультрафиолетовой недостаточности, снижению бактерицидных свойств кожи, понижению естественного иммунитета, в особенности в зданиях без окон [11, 26].

Известное общее дезадаптирующее действие СВЧ излучения в сочетании с другими сопутствующими факторами нуждается в дальнейших экспериментальных и клинико-физиологических исследованиях, особенно если речь идет об одном из самых мощных из сопутствующих факторов — рентгеновском излучении.

7.4.3. Защита от рентгеновских излучений СВЧ устройств. Рентгеновское излучение так же, как и радиоволновое, является потоком энергии электромагнитных волн, но их длина значительно меньше длины волны радиоволнового излучения; она составляет $10^{-12}...10^{-6}$ см.

Различают два механизма испускания рентгеновских лучей. Первый — резкое торможение электронов в веществе (тормозное излучение), в результате которого появляется поле излучения, т. е. возникает рентгеновское излучение. Второй — электронная бомбардировка антикатода приводит к вырыванию электронов из внутренних оболочек его некоторых атомов. На освободившиеся места переходят электроны из внешних оболочек тех же атомов, а это связано с появлением характеристического рентгеновского излучения с линиями испускания, «характерными» для атомов вещества антикатода. Тормозное излучение всегда сопровождается характеристическим.

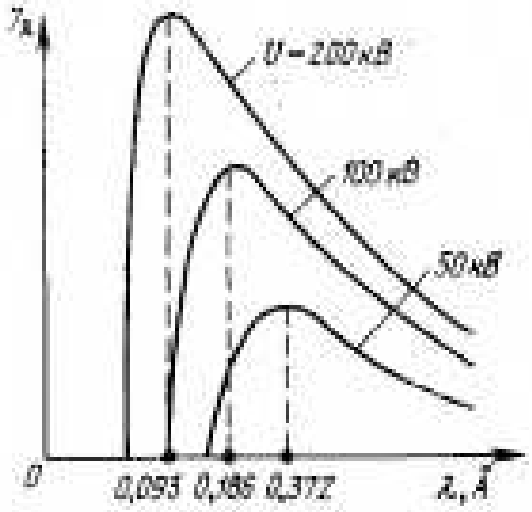


Рис. 7.4.1. Распределение энергии по непрерывному спектру рентгеновских лучей.

Спектр тормозного излучения непрерывен, т. е. образующиеся кванты рентгеновского излучения обладают всевозможными величинами энергии: от нулевого до максимального, равного кинетической энергии электрона. Это обусловлено тем, что радиационное взаимодействие происходит не только с электронами, обладающими первоначальной кинетической энергией, но и с электронами, потерявшими часть энергии на ионизацию и возбуждение. Распределение энергии излучения по длинам волн в непрерывном спектре при постоянном ускоряющем напряжении имеет вид, показанный на рис. 7.4.1. Здесь по оси абсцисс отложена длина волны излучения, а по оси ординат — спектральная интенсивность. Минимальная длина волны λ_0 определяется из соотношения [9] $\lambda_0 = 12{,}37/U$, где λ_0 — длина волны, Å; U — ускоряющее напряжение, кВ.

Максимум спектральной интенсивности соответствует длине волны $\lambda_{макс}$, определяемой из соотношения $\lambda_{макс} = 3/2\lambda_0$.

Интенсивность рентгеновского излучения пропорциональна порядковому номеру (z) элемента материала антикатода, току электронного пучка, бомбардирующего антикатод, и квадрату ускоряющего напряжения. Высоковольтные электровакуумные приборы (кенотроны, тиратроны, магнетроны, клистроны, разрядники), используемые в радиотехнических средствах, представляют собой своего рода рентгеновские трубки, т. е. они являются источниками рентгеновского излучения. В табл. 7.4.2 приведена радиационная характеристика некоторых высоковольтных электровакуумных приборов, используемых в ВЧ и СВЧ установках.

В рентгенометрии облучение оценивается по мощности дозы (поглощенной или экспозиционной). Под интенсивностью излучения понимают энергию, переносимую излучением в единицу времени через единицу площади нормально расположенной поверхности. Под поглощенной дозой понимается рассчитанная на единицу массы облученного вещества поглощенная энергия излучения.

Таблица 7.4.2.

Примерные значения мощности дозы рентгеновского излучения некоторых электровакуумных приборов [133]

Тип прибора	Мощность дозы, мР/ч
ГМИ-90; ГМИ-93	1000 . . . 10 000
ГИ-2А; ГИ-4А; ГМИ-2Б; ГМИ-5; ГМИ-7; ГМИ-30;	100 . . . 1 000
ГМИ-83В; В1-0,03/13	10 . . . 100
В1-0,1/40; В1-0,1/30	
ТГИ-1-500/20; ТГИ-1-70/25	1 . . . 10

Под экспозиционной дозой понимается энергия квантового излучения, преобразованная в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы образцового вещества (воздуха). Экспозиционная (поглощенная) доза, отнесенная к единице времени, называется мощностью экспозиционной (поглощенной) дозы. Мощность дозы P и интенсивность излучения $\mathcal{J}$ связаны между собой соотношением $P = \mu_m \mathcal{J}$, где μ_m — так называемый массовый коэффициент передачи энергии.

За единицу мощности экспозиционной дозы в практике рентгенометрии принята внесистемная единица — рентген в секунду. Для персонала, обслуживающего радиотехнические устройства, содержащие источники возможного паразитного рентгеновского излучения, за допустимый уровень облучения приняты: 0,28 мР/ч — при 6-часовом рабочем дне и 0,2 мР/ч — при 8-часовом.

Определенную степень защиты от рентгеновского излучения обеспечивает корпус (колба) самого электровакуумного прибора и стенки корпуса шкафа. Но во многих случаях величина этого ослабления оказывается явно недостаточной и приходится применять специальные дополнительные экраны. Действие экранов заключается в том, что при прохождении излучения через слой вещества

происходит ослабление интенсивности (мощности дозы). Для монохроматического параллельного пучка излучения зависимость величины ослабления от толщины экрана носит экспоненциальный характер:

$$P_t = P_0 \cdot e^{-\mu t},$$

где P_0 — мощность дозы перед поглотителем при отсутствии защиты, P_t — мощность дозы после слоя поглотителя толщиной t, μ — линейный коэффициент ослабления излучения.

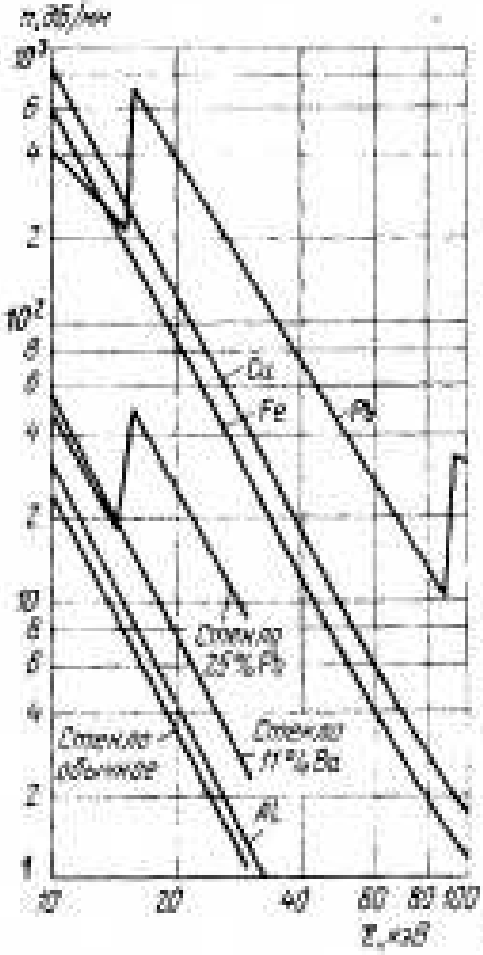


Рис. 7.4.2. Ослабление монохроматического рентгеновского излучения (дБ/мм) некоторыми материалами в зависимости от энергии излучения.

Для практических расчетов удобно пользоваться графиками зависимости $n = f(\mathcal{E})$, приведенными на рис. 7.4.2. Здесь по оси абсцисс отложена энергия фотонов, а по оси ординат — ослабление (в дБ) на единицу толщины поглотителя. Тормозное немонохроматическое излучение можно рассматривать как монохроматическое с некоторой эффективной энергией $\mathcal{E}_{эф}$ и эффективным коэффициентом ослабления $\mu_{эф}$, который зависит от рода вещества поглотителя, энергии излучения и от толщины поглотителя. Последнее обусловлено тем, что по мере прохождения через вещество различные компоненты спектра немонохроматического излучения будут поглощаться по-разному. Так как фотоны малых энергий ослабляются сильнее, то с увеличением слоя вещества в спектре прошедшего излучения будет возрастать доля фотонов бо́льших энергий, т. е. жесткость излучения будет увеличиваться. Для практических расчетов, связанных с защитой персонала РТС, при использовании графиками, приведенными на рис. 7.4.1, за эффективную энергию излучения принимается величина, численно равная kU, где U — ускоряющее (анодное) напряжение, подаваемое к электровакуумному прибору, а $k = 0{,}75 \ldots 0{,}9$ — коэффициент, зависящий от степени фильтрации. Меньшее значение коэффициента соответствует меньшей фильтрации, большее — большей.

Необходимая толщина защитного материала t (в мм) определяется так:

$$t = \frac{10}{n} \ln \frac{P_0}{P_{доп}},$$

где n — ослабление излучения материалом (дБ/мм), $P_{доп}$ — допустимая мощность дозы (для большинства случаев берется равной 0,2 мР/ч).

Необходимо отметить, что для защиты от излучений сравнительно небольших энергий (до 40...50 кэВ) нецелесообразно использовать дефицитный свинец, а в большинстве случаев можно ограничиться сталью. Корпус шкафа устройства, выполненный из стали, для таких энергий уже практически является достаточной защитой. Выполнение шкафов из алюминиевых сплавов, как правило, приводит к прохождению рентгеновского излучения сверх допустимых норм. Смотровые окна шкафов (устройств) во избежание прохождения рентгеновского излучения должны застекляться специальными защитными свинцовыми стеклами, например типа ТФ (см. также [9]).

Измерение мощности дозы рентгеновского излучения на РТС связано с рядом трудностей, вызванных импульсным характером излучения (для большинства РТС) и его резкой энергетичностью. Многие типы существующих дозиметров и рентгенометров из-за значительного «хода с жесткостью»* в области малых энергий, а также из-за сильной зависимости от импульсного характера излучения не могут быть использованы для этих целей, так как были разработаны для проверки ионизирующих излучений.

В настоящее время промышленностью выпускается рентгенометр мягкого импульсного и непрерывного рентгеновского излучения для диапазона энергий 15...1250 кэВ типа ДРГЗ-1. Он в достаточной степени защищен от ВЧ, СВЧ и магнитного полей применением специальных экранов. В качестве детектора в нем используется комбинированный воздухоэквивалентный сцинтиллятор, в котором фактически устранен «ход с жесткостью» в области малых энергий. Ввиду сравнительно небольшой рабочей поверхности детектора он позволяет измерять мощность дозы рентгеновских излучений узких пучков (что часто имеет место на РТС). Серийный выпуск таких рентгенометров и обеспечение ими служб техники безопасности позволяет решить вопрос радиометрии рассмотренных излучений.

7.4.4. Об оценке защитных мероприятий. Из всех рассмотренных выше вопросов — биологические и медицинские исследования, прогноз, радиометрия, защита — работы по защите в наибольшей степени затрагивают сферу инженерной экономики. Затраты сил и средств на проведение защитных мероприятий (производство, установка, эксплуатация) во много раз превышают затраты на проведение измерений, составление прогноза и тем более научные исследования. Зачастую эти затраты сопоставимы со стоимостью самих РТС. Кроме того, внедрение средств и методов защиты как правило сопровождается отрицательным (редко—положительным) влиянием на РТС, в то время как влияние работ по

---

* Зависимость чувствительности детектора от жесткости излучения (от энергии квантов).

прогнозу и радиометрии полей на тактико-технические характеристики станций практически отсутствует. Наконец, организация защиты всегда затрагивает сферу труда и быта многих людей и поэтому требует учета в целом условий труда, включающих влияние СВЧ излучений *как одного из многих* (см. сноску на стр. 332) действующих факторов.

Условия труда определяются, с одной стороны, психо-физиологическими особенностями работы (например, преимущественно физическая или умственная нагрузка, нервная напряженность, степень ответственности проводимых работ и т. п.), с другой — санитарно-гигиеническими условиями (микроклимат, воздействие специфических факторов и т. д.). Одна из последних работ, проводимых в целях увязки этих двух сторон [75], предполагает разделение тяжести условий труда по каждому из действующих факторов на 6 степеней с четким нормированием внутри каждой степени для последующего расчета величины $K_т$ — коэффициента комплексной категории тяжести условий труда определенного сотрудника:

$$K_т = -0{,}3 + 0{,}56K_{напр} + 0{,}54K_{среды},$$

где $K_{напр}$ — среднеарифметическая степень психофизиологической напряженности условий труда; $K_{среды}$ — среднеарифметическая степень санитарно-гигиенических условий труда; допустимое значение $K_т = 2 \ldots 3$.

Значения $K_{напр}$ и $K_{среды}$ определяются из подробных таблиц, являющихся результатом большого труда по определению степени влияния на трудоспособность организма раздельно каждого фактора. Пример учета такого влияния для некоторых характерных факторов, встречающихся на РТС СВЧ, приведен в табл. 7.4.3).

В соответствии с новым подходом, условия труда для каждого работающего оцениваются не раздельно по каждому фактору, а суммарно, причем для сохранения конечного результата оказывается допустимым выход каких-либо факторов за нормативные пределы за счет облегчения других условий.

Значение $K_т$, рассчитанное по формуле (7.4.6) с учетом данных табл. 7.4.3, может быть использовано, в частности, для прогноза снижения работоспособности человека в конце недели. Зависимость производительности труда $П_т$ (в процентах) от $K_т$ условно может

быть представлена в виде графиков, приведенных на рис. 7.4.3 (раздельно для снижения трудоспособности за счет естественной утомляемости плюс из-за влияния неблагоприятных условий труда, либо отдельно за счет условий труда — по В. А. Крылову).

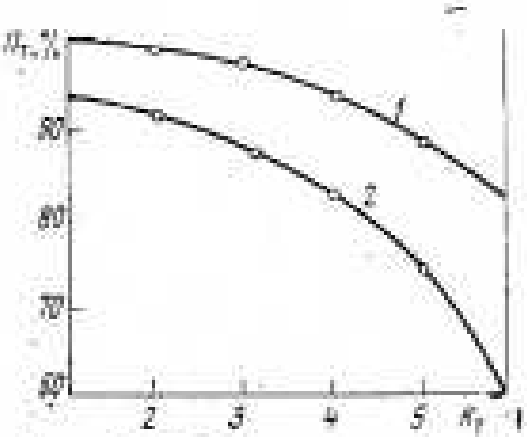


Рис. 7.4.3. Зависимость производительности труда к концу недели $П_т$, обусловленная влиянием неблагоприятных условий труда:

1 — только из-за условий труда; *2* — комплексно из-за неблагоприятных условий труда и естественной утомляемости.

Знание коэффициента $K_т$ позволяет количественно подойти и к определению целесообразности проведения определенных защитных мероприятий на основе сопоставления затрат на необходимые доработки с выигрышем в результате повышения производительности труда (до сих пор это делали, в основном ссылаясь на необходимость улучшения условий труда, улучшения быта и т. п.). Эти защитные мероприятия могут быть прямыми, снижающими, например, интенсивность воздействующего фактора, либо косвенными, перераспределяющими ответственность между разными лицами или уменьшающими требования к объему оперативной памяти (снижая информационную напрузку) и т. п. Средства и методы защиты обычно выбирают с учетом стоимостных характеристик, условий эксплуатации, эстетики и т. п.

Конечно, цель любых защитных мероприятий — улучшение условий труда. С другой стороны, наличие объективных данных об условиях труда, в данном случае выраженных через коэффициент $K_т$, позволит разумно подойти к выбору льгот (укороченный рабочий день, дополнительная оплата за вредность, увеличенная продолжительность оплачиваемого отпуска, сокращение срока выхода на пенсию и т. д.).

Если исключить шум и некоторые психофизиологические факторы на РТС СВЧ, то вблизи излучающих антенн наиболее активным фактором внешней среды (особенно в помещениях передатчиков, антенно-фидерных устройств), во многом определяющим степень тяжести условий труда, являются электромагнитные излу-

Таблица 7.4.3

Дифференциация основных и некоторых дополнительных условий труда по тяжести (указаны средние значения)

Составлено по данным [75] с сокращениями

Психофизиологические условия труда и их показатели	Единица измерения	Степень тяжести условий труда, $K_{инд}$					
		1	2	3	4	5	6
Физическая нагрузка							
Динамическая нагрузка (мощность, необходимая для перемещения груза с участием мышц плечевого пояса) — с участием мышц ног и туловища увеличивается в 2 раза	Вт	до 6	8	12	20	30	более 45
Статическая нагрузка:							
одной рукой	кг/с·10^3	до 12	15	22	30	60	более 97
двумя руками		до 32	38	50	80	150	» 203
с участием мышц корпуса и ног		до 47	50	70	100	180	» 266
Нервно-психическая нагрузка							
Напряженность внимания (учитывается один из факторов):							
число производственно важных объектов одновременного наблюдения	ед.	до 4	5	6	9	18	более 25
длительность сосредоточенного наблюдения (в % от длительности смены)	%	до 12	18	32	43	62	более 75
средняя плотность сигналов	1/ч	до 35	50	100	150	230	более 300

Продолжение табл. 7.1.3

Психофизиологические условия труда и их показатели	Единица измерения	Степень тяжести условий труда, $K_{напр}$					
		1	2	3	4	5	6
Эмоциональное напряжение	—	Работа по индивидуальному плану		Работа по установленному графику с возможностью его корректировки исполнителем		Дефицит времени с повышенной ответственностью	Личный риск, опасность, ответственность за безопасность других лиц
Напряженность анализаторных функций:							
зрения, минимальные размеры объектов	мм	Различения не требуется	Более 10	10...1	1...0,3	0,3...0,1	Менее 0,1
слуха, разборчивость слов	%	100	100	90	70	45	Менее 30
Объем оперативной памяти (количество элементов и время, в течение которого их следует помнить)	ед.	1	1	2	2	4	5
	ч	1	1,5	1	1,5	2	8

Продолжение табл. 7.4.3

Психофизиологические условия труда и их показатели	Единица измерения	Степень тяжести условий труда, $K_{напр}$					
		1	2	3	4	5	6
Монотонность (время пассивного наблюдения за ходом производственного процесса)	%	до 75	78	83	87	93	98
Уровень новизны	—	Отсутствие необходимости принимать решения		Решение простых альтернативных задач (типа „да" — „нет")		Решение сложных задач по известному алгоритму	Эвристическая (творческая) деятельность***
Сменность	—	Утренняя, 7...8 ч		Две (без ночной) по 7...8 ч		Три (с ночной) по 7...8 ч	Нерегулярная, с работой ночью

Продолжение табл. 7.4.3

Санитарно-гигиенические показатели и их условия	Единица измерения	Степень тяжести условий труда					
		1	2	3	4	5	6
*Микроклимат на рабочем месте**							
При наружной температуре ниже +10 °С:							
— температура воздуха	°С	21...17	21...14	18...11	14...4	—5...—20	—7...—35
— влажность	%	60...30	75...60	75...60	100...0	100...0	100...0
При наружной температуре выше +10 °С							
— температура воздуха	°С	23...19	26...23	28...27	32...29	30...35	30...35
— влажность	%	60...30	57...60	60...50	60...40	40...0	100...40
Атмосферное давление							
— пониженное (указана высота работы над уровнем моря)	м	до 100	250	750	2000	3500	Более 4000
— повышенное (указано превышение давления над нормальным)	атм	0,1	0,3	0,75	1,5	2,5	3,5
Шумы, вибрации по отношению к ПДУ (ПДУ по шуму: СН 758-69; по вибрациям СН 626-66 и СН 627-66)	дБ	—10	—10	0	Менее 10	Более 10	Более 10 (одновременно шум и вибрации)
Наличие в воздухе вредных паров, газов и пылей по отношению к ПДК (СН 245-63)		Нет контакта	Менее 1	≈1; для веществ С, Г** <1	3; для веществ С—1; для веществ Г — ниже 1	6; для веществ С—3; для веществ Г—1	Более 6; для веществ Г—3
Электромагнитное излучение		Данных не имеется					

* Приведены средние значения для двух крайних степеней тяжестей труда (первой и шестой). ** Здесь условно приняты: вещества С — с кумулятивными и сенсибилизирующими свойствами; вещества Г — с гонадотропными, мутагенными или канцерогенными свойствами. *** Программа составляется субъектом, достижимость цели проблематична, возможны отрицательные результаты труда.

Классификационная таблица технико-эксплуатационных пока (заполнение

Таблица 7.4.4

зателей современных технологических средств и методов защиты условное)

Тип защитных мероприятий	Конкретные примеры реализации	Стадия разработки	Условия конкретного применения	Технические показатели			Экономические показатели						Ограничения в использовании
				Специфические показатели	Степень отрицательного влияния		Стоимость производства, руб.	Дефицит материалов	Затраты при установке на месте		Издержки эксплуатации, руб/год	Гарантированный срок эксплуатации, лет	
					на излучатель	на объект защиты			трудо, чел.-г	средств, руб.			
Коллективная защита													
Изменение алгоритма обзора пространства	Подъем луча в частичном секторе кругового обзора	III	Целесообразно	Δz, $\Pi_{ост}$	Требуются изменения в конструкции	Нет	...	...	...	...	Незначительные	Высокий	Тактические соображения
	Уменьшение статистической вероятности облучения при программном обзоре												
Изменение режима работы передающих устройств	Блокирование излучения в заданном секторе	II	Целесообразно	Δz	Требуются изменения в конструкции	Нет	...	...	...	...	Незначительные	Высокий	Тактические соображения
	Уменьшение мощности излучения при учебных и т. п. работах	Для данного примера					эти типы защитных мероприятий не выбраны						
Сокращение облучаемости с помощью методов предварительного моделирования (в период НИР, ОКР ...)	Внедрение математических методов												
	Применение низкоэнергетических моделей												
	Внедрение методов, допускающих снижение мощности излучения реальной аппаратуры												
Сооружение внешних экранов (у антенн и перед объектом защиты)	Металлические сетки	VI	Целесообразно	l, $B_{экр}$ H	Есть сектор закрытия	Нет	...	...	...	...	...	Средний	Стоимость и дефицит материалов
	Каркасы нежилых зданий	V	Целесообразно	l, H $B_{экр}$	То же	Нет	...	...	...	...	Нет	Высокий	Стоимость
	Лесонасаждения	V	Целесообразно	l, $B_{экр}$ сорта	То же	Нет	Незнач.	Нет	Незнач.	Незнач.	...	10...70	Сроки ввода
Подъем антенн РЛС	Металлические или кирпичные каскады	IV	Целесообразно	$\Pi_{ост}$ ΔH	Требуются изменения в конструкции	Почти нет	...	...	...	...	...	...	Стоимость и механическая устойчивость
	Насыпи	Для данного примера					этот тип защитных мероприятий не выбран						

Продолжение табл. 7.4.4

Тип защитных мероприятий	Конкретные примеры реализации	Стадия разработок	Условия конкретного применения	Технические показатели			Экономические показатели						Ограничения в использовании
				Специфические показатели	Степень отрицательного влияния		Стоимость производства, руб.	Дефицит материалов	Затраты при установке на месте		Издержки эксплуатации, руб/год	Гарантированный срок эксплуатации, лет	
					на излучатель	на объект защиты			труда, чел.-ч	средств, руб.			
Планирование размещения (с выбором в качестве основного критерия минимизации облучаемости).	Удаление от излучающей РЛС	Для данного примера эти типы					защитных мероприятий не выбраны						
	Использование естественных экранов (складки местности, лес и т. п.)												
Локальная защита													
Внутренняя экранировка от внешнего воздействия	Экранирование стен (фольга, сварные конструкции, металлизированные обои, краска и т. п.)	V	Целесообразно	$B_{экр}$	Нет	Почти и	...	...	...	...	Нет	Средний	Дефицит материалов и эстетика
	Экранирование окон (металлиз. тюль, сетки, радиозащитное стекло)	V	Ц	$B_{экр}$	Нет	Необходим запрет открывать окна	...	...	...	...	Незначительный	Средний	Дефицит материалов и эстетика
	Радиопоглощающие материалы	Для данного примера эти типы					защитных мероприятий не выбраны						
Экранирование аппаратуры	Антенные насадки и эквиваленты антенн; двойная экранировка аппаратуры; „требенка"; спец. устройства вводов, муфты волноводных стыков												
Индивидуальная защита													
Средства частичной и полной защиты	Щиты, навесы	Для данного примера					этот тип защитных мероприятий не выбран						
	Костюмы	VI	Целесообразно	—	Нет	Ухудшение гигиенических условий	...	...	Нет	Нет	Незначительный	Высокий	Ухудшение гигиенических условий в подзаземном пространстве и ограничение движений
	Халаты, фартуки; очки, маски	Для данного примера					этот тип защитных мероприятий не выбран						

Примечания: I — известны принципы, II — известно инженерное решение; III — проведена НИР; IV — проведена ОКР; V — имеются готовые технологические проекты, VI — имеются готовые образцы. $П_{ост}$ — остаточная ППМ; $B_{экр}$ — защитные свойства экрана; Аа — сектор выключения излучения или подъема луча; l — длина экрана; ΔH — дополнительная высота подъема РТС; H — высота экрана; . . . заполняется в конкретных условиях.

чения *. Правильная организация защиты от СВЧ излучений, выбор тех или иных инженерно-технических методов и средств состоит в том, чтобы с учетом экономических факторов влияния на защищаемый объект и РТС, времени установки, простоты и надежности эксплуатации:

— распределить величину заданного коэффициента ослабления между выбранными методами и средствами, между естественными и искусственными экранами, между средствами индивидуальной, локальной и коллективной защиты;

— провести инженерный расчет средств защиты;

— организовать систему контроля.

Естественно, предварительные расчеты можно сделать только на основании данных по конкретной обстановке.

В некоторых случаях этому может помочь сравнительный анализ методов, собранных в единую систему — например, по форме табл. 7.4.4, в которой приведен также пример заполнения по данным, которыми можно охарактеризовать следующую ситуацию. Облучает территорию станция кругового обзора, работающая в низкочастотной части СВЧ диапазона. Станция размещена на земляной насыпи. Необходима защита: а) административного здания на позиции станции (вне рабочего участка сектора); б) обслуживающего персонала, работающего в помещении (окна в сторону рабочего участка сектора антенны); в) части персонала, который проводит кратковременные работы в генераторном зале с ППМ выше допустимой.

В такой обстановке целесообразно для защиты здания применить подъем луча, блокировку излучения в частичном секторе, постановку металлической сетки, постройку нежилого каменного или металлического здания (между антенной и административным зданием), подъем антенны на эстакаду.

Для защиты персонала от антенных излучений необходимо экранирование стен и окон (сталь, проводящая краска, фольга, тюль, стекло). Для защиты от паразитных излучений можно экранировать аппаратуру, применять ширмы, радиозащитные костюмы.

---

* При оценке степени вредности СВЧ излучений там, где они хотя бы в какой-то степени могут появиться, гигиенисты, как правило, пытаются найти максимум излучения, иногда даже там, где людей никогда не бывает. Это резко повышает оценку облучаемости. Такое положение можно попытаться оправдать желанием преувеличить отрицательную роль СВЧ поля, в то время как на человека часто одновременно действуют такие мощные патогенные факторы, как различного рода психические стрессоры, шум, вибрации и т. п. Оценка общего санитарно-гигиенического состояния помещений и рабочих мест на основании учета всех факторов среды (например, по методике, рассмотренной выше) позволит объективизировать расчет опасности и при необходимости гибко подойти к разработке мер защиты.

Предварительно, в результате анализа конкретной обстановки и средств защиты, для защиты административного здания было выбрано строительство дополнительного кирпичного дома с металлической крышей («показалось», оно может быть использовано как склад) и одновременно блокировка излучения в заданном секторе (здесь это технически просто осуществимо); для защиты персонала — металлизированные обои (сталь со сварными швами излишня, краска дефицитна) и стекло с двуокисью олова (металлизированный тюль непригоден, так как в нижнем участке СВЧ усложняется вопрос стыковки тюля с фольгой стен). Для защиты людей от паразитных излучений пригодны только халат с маской-шлемом или костюм, так как аппаратура экранирована с достаточной тщательностью, а ширмы на нижнем участке СВЧ диапазона неэффективны.

Окончательный выбор средств защиты производится только после заполнения граф таблицы по выбранным предварительно средствам и методам с учетом наличия денег, рабочей силы, возможности проведения доработок станций, наличия материалов и т. п.

Таблица по приведенной здесь форме (табл. 7.4.4) может быть рекомендована также для анализа сводных данных о состоянии и необходимости дальнейшей разработки, об условиях применения и о технико-экономических показателях всех средств и методов защиты от СВЧ излучений по отдельным ведомствам или по стране в целом *. С усложнением внедряемых в практику защиты от СВЧ излучений средств и методов такой анализ оказывается очень полезным при выборе и обосновании защитных мероприятий.

При оценке экономической эффективности мероприятий следует пользоваться общими работами по экономическим расчетам, методиками и руководящими документами, выпущенными АН СССР и некоторыми министерствами (например, [32, 88]).

Правильная техническая политика в области защиты от СВЧ излучений, как и от других вредных факторов, состоит в сочетании следующих трех основных моментов:

— вовремя обнаружить опасность;

— с достаточной точностью определить необходимую и достаточную степень защиты;

— с минимальными затратами обеспечить заданную степень защиты.

Разработке рекомендаций по последнему пункту и была посвящена, в основном, данная глава.

---

* Данные, приведенные в ней в качестве примера, при этом, естественно, должны быть исключены.

История гигиены СВЧ как отрасли науки немногим превышает 20 лет, но за это время уже успели сформироваться ее основные разделы: нормирование, определение параметров поля (путем измерения или расчета) и защита.

Как видно из книги, основой нормирования являются данные биофизических и медицинских исследований, обработанные в соответствии с выбранным критерием. Выбор критерия зависит от ряда факторов: национальных, социальных и даже моральных и этических. Именно этим можно объяснить существующие различия в нормативах, принятых в СССР, социалистических странах и в странах Запада.

Имеющиеся к настоящему времени данные биофизических и медицинских исследований позволяют сделать вывод, что основные патологические изменения возникают при непрерывном длительном облучении полем с плотностью мощности 1 . . . 10 мВт/см² и более, но чувствительность организма к воздействию поля замечена при очень низких плотностях, начиная с единиц и даже долей микроватт на квадратный сантиметр. Реакция организма на эти воздействия обычно едва различима на уровне естественных колебаний состояния организма. Поэтому воздействие поля с интенсивностью порядка единиц и даже десятков микроватт на квадратный сантиметр не может считаться сколько-нибудь опасной.

Все данные, полученные до сих пор в экспериментах при длительном облучении, не могут быть перенесены на реальные условия облучаемости полем в зоне действия антенн с перемещающимися диаграммами направленности. Кроме того, в опытах исследователи, как правило, пренебрегают важной стороной — однородностью электромагнитной структуры поля, а данные, полученные в непосредственной близости от облучателя естественно, могут считаться правильными только для тех условий, при которых производился опыт.

Все это заставляет ставить вопрос о необходимости проведения цикла всесторонних исследований биофизического, биохимического и медицинского характера, направленных, в первую очередь, на выяснение биологической эффективности полей разных диапазонов волн, разных длительностей воздействия и особенно полей в зоне

индукции с явно выраженной квазиэлектрической и квазимагнитной структурой. Данные таких исследований, проведенных с необходимой тщательностью, могут послужить основой для выработки научно обоснованных нормативов, пригодных для оценки прерывистых (периодических, эпизодических или одиночных) воздействий в поле бегущей волны или в зоне индукции. Дозный (интегральный) метод нормирования, рассмотренный в книге, является, на наш взгляд, одним из возможных путей разработки обобщенных нормативов, учитывающих реальный временной характер работы современных излучателей.

В условиях непрерывного повышения излучаемых мощностей оптимизация нормирования явится первым и основным фактором, направленным на упорядочение всех последующих работ по выбору и проектированию средств защиты и в конечном итоге — на экономию государственных средств. Одновременно, но самостоятельно будут разрабатываться методы биологической профилактики, в которых, вероятно, кроме обычных методов лечебной медицины можно будет использовать активизацию собственных защитных сил организма.

На решение задачи оптимизации средств и методов защиты (как всего комплекса мероприятий, направленных на снижение биологической вредности энергии СВЧ) направлена также разработка методов прогноза и измерения радиоизлучений. Четырехступенчатая система последовательного контроля радиобезопасности (СПКР) является, видимо, наилучшей системой постепенного уточнения степени облучаемости на всех этапах разработки и внедрения РТС — от «чистого» прогноза на этапе проектирования, через этапы контроля с учетом конкретных свойств местности, затем с учетом характеристик конкретной антенны до измерений ППМ в реальных условиях.

Применение для прогноза «классических» методов расчета поля приводит к значительному и неоправданному удорожанию процесса прогноза биологической опасности, а часто и вообще к отказу от применения расчетных методов (их заменяют догадками или сомнительной аналогией с эксплуатируемыми станциями, по которым уже имеется экспериментальный материал). Ретроспективный метод расчета, рассмотрению которого в книге уделено значительное место, охватывает боль-

ной класс используемых в настоящее время антенн; очевидно, это — первый из возможных путей построения системы прогноза, учитывающей специфику работ, проводимых в интересах радиобезопасности. В дальнейшем потребуются еще определенные усилия, которые бы позволили применить этот или другой подобный метод для расчета поля антенн, формирующих сложные диаграммы направленности.

Не совсем ясен и требует скорейшей постановки исследований вопрос о теоретических методах учета влияния земли на распространение энергии СВЧ вдоль земной поверхности в области малых высот (единицы — десятки длин волн) и небольших расстояний (порядка 3 ... 10 км). Влияние земли, определенное для этих условий по широко известным интерференционным формулам, существенно отличается от экспериментальных данных. Во всех перечисленных случаях единственным способом правильно оценить радиообстановку является измерение.

Измерительная техника радиогигиены к настоящему времени пополнилась специальными приборами, пригодными для экспресс-измерений полей фактически во всех «трудных» ситуациях: прерывистые и непрерывные излучения малой интенсивности, импульсное поле внутри кабин станций с генераторной аппаратурой. Большинство их пока находится в стадии исследовательских разработок или находит применение в узких масштабах отдельных ведомств. Внедрение разработанных приборов повсеместно в практику гигиены СВЧ позволит значительно улучшить качество оценки полей в этих особых условиях и намного снизить временну́ю и денежную стоимость измерительных работ.

Основные способы защиты — организационные, инженерно-технические и лечебно-профилактические — могут быть применены в комплексе или отдельно, но выбор степени участия каждого является задачей достаточно трудной и не всегда четко определенной. В книге не удалось дать четкую оценку уже разработанных методов защиты по их эффективности, трудоемкости внедрения и стоимости эксплуатации. Не рассмотрен этот вопрос и в известной автору литературе.

Требует своего подробного описания также вопрос об изменениях конструкций самих антенн излучателей

для снижения таким путем уровня бокового поля в интересующем интервале вертикальных углов.

В будущем, возможно, придется пересмотреть взгляд на методологию конструирования антенн: значительное повышение уровней излучаемых мощностей при сегодняшних уровнях боковых излучений и существующих пока нормативах вряд ли позволит обойтись разумными затратами сил и средств на конструирование достаточно эффективной защиты в зоне единиц километров от излучаемых антенн. Одним из реальных путей снижения опасности переоблучения в этом случае может явиться конструирование антенн со специальными функциями освещения апертуры, снижающими боковые излучения до необходимого минимума. Достижению этой же цели могут способствовать поглощающие экраны перед антеннами, подъем антенн на значительную высоту и т. д.

Нам представляется, что произойдет также определенная переоценка ценностей и в области профилактики и лечения заболеваний, прямо или косвенно связанных с воздействием радиоволн. Наблюдаемый при воздействии СВЧ полей на организм человека комплекс симптомов не является существенно специфичным и скорее отражает типичную реакцию организма в целом на воздействия постороннего раздражителя. Поэтому именно общеоздоровительные методы лечения, а не прицельный огонь по отдельным симптомам, явятся основной формой лечения последствий сверхмощных воздействий радиополя. Вполне возможно, что в основу этих методов будут положены идеи нормализации всего образа жизни и, в первую очередь, ее физиологической стороны: питания, дыхания, кровообращения. История этих идей уходит в глубь веков и неразрывно связана с именами мудрейших Авиценны, Гиппократа, с тысячелетним народным опытом России, Индии, Африки, Китая, однако они и сейчас звучат удивительно молодо.

Homo sapiens как биологический вид потерял основную движущую силу развития всего живого — естественный отбор, но как вид социальный человечество достигло огромных высот в своем развитии. Выработанные на протяжении тысячелетий нравственные принципы, постепенно узаконенные нами же созданными социальными институтами, узаконили гуманизм как основу нашего прогресса. Поэтому сейчас, в эру цивилизации, рассчитывать на возрождение законов естественного от-

бора нельзя. Появилась основа для накопления наших биологических недостатков, многие из которых могут передаваться по наследству. Иммунитет генетического кода уже не может справляться с нарастающим потоком воздействия биологически отрицательных экологических факторов, одним из которых, видимо, уже является или явится в недалеком будущем радиоволновая энергия.

Человек пока еще в малой степени использует созидающую силу интеллекта и тем более психические способности для понимания и активной эксплуатации внутренних биологических законов, которые, возможно, в самом недалеком будущем можно будет противопоставить намечающимся негативным тенденциям. К таким возможностям уже сейчас относят использование межнационального потенциала (межнациональные браки) и генетические способы воздействия на качество потомства. Сегодня можно себе представить и некоторые другие пути в этом направлении, к которым прежде всего следует отнести и методы, предполагающие совершенствование и оздоровление нашего организма. Успехи, уже сейчас достигнутые с помощью этих методов, позволяют возлагать большие надежды и в отношении снижения СВЧ патологии.

Медико-биологические и инженерные методы защиты человека от нового экологического фактора — радиоволновой энергии — призваны вместе решить задачу создания высокоэффективной и экономичной системы защиты людей. Рассмотрению некоторой части полученных решений и была посвящена эта работа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александрова Л. М. Электрические свойства варикондов, изготовленных в условиях опытного производства. МРП. 1956.
2. Альперт А. Л., Гинзбург В. Л., Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн. Гостехиздат, 1953.
3. Амосов Н. М. Жить не болея. Газета «Неделя», 1970, № 48.
4. Антенны сантиметровых волн. Пер. с англ. Под ред. Я. Н. Фельда. М., «Сов. радио», 1950.
5. Антенны эллиптической поляризации. Пер. с англ. М., ИЛ, 1961.
6. Баглай Р. Д. Анализ и синтез широкополосных усилителей постоянного тока с преобразователем спектра сигнала. Канд. дис. СО АН СССР, Новосибирск, 1963.
7. Бадаева О. Н. Исследование металлических пленок в качестве термосопротивлений измерителя мощности повышенной точности в коротковолновой части сантиметровых волн. Канд. дис. ГКРЭ. М., 1958.
8. Баренбойм Г. М., Либерман А. Н., Новиков В. П. Некоторые вопросы медицинской защиты при ремонте и постройке радиолокационной аппаратуры. — «Сб. научных работ врачей Черноморского флота». 1959, вып. 1.
9. Бибергаль А. В., Маргулис У. Я., Воробьев Е. И. Защита от рентгеновских и гамма-лучей. М., Медгиз, 1960.
10. Богданов Г. Б. О возможности применения ферритов для абсолютного измерения мощности СВЧ. — «Радиотехника и электроника», 1961, т. VI, вып. 4.
11. Боченкова Т. Д., Кокарев Н. П. Некоторые аспекты гигиенической оценки условий труда в бесфонарных и безоконных зданиях. — «Гигиена труда», 1970, № 11, с. 40—42.
12. Браун У. К. Прогресс в разработке реактив. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1970, № 8, с. 109.
13. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. М., Гостехиздат, 1957.
14. Брянский Л. Н., Левин М. М., Розенберг В. Я. Радиоизмерения. Методы. Средства., Погрешности. М., Изд-во стандартов, 1970.
15. Бузников В. С., Мелехов М. И. Поверка антенн П6-21 и П6-22 в помещении. — В кн.: Исследования в области радиотехнических измерений. Труды ВНИИФТРИ. Вып. 81 (141). М., Изд-во стандартов, 1966, с. 63—65.
16. Бутейко К. П., Осциллографы и гипертония. — «Изобретатель и рационализатор», 1962, № 5, с. 7—9.
17. Валитов Р. А., Мирный И. Н., Кеслер В. В. Метод измерения основных параметров поля СВЧ. Авт. свидетельство № 137145. — «БИ», 1961, № 7.

18. Валитов Р. А. и др. Измеритель малых уровней мощности электромагнитного излучения. Авт. свидетельство № 218250.— «БИ», 1968, № 17. Авт. изобретения: Р. А. Валитов, С. Ф. Дюбко, В. М. Кузьмичев, В. А. Свич.
19. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. Физматгиз, 1962.
20. Вервекин Э. Д., Никитин Ю. К., Шаравский П. В. Устройство для ослабления воздействия ударных шумов на органы слуха. Авт. свидетельство № 269414.—«БИ», 1970, № 15.
21. Вервекин Э. Д., Никитин Ю. К. Способ защиты человека от ударных шумов. Авт. свидетельство № 270186. — «БИ», 1970, № 16.
22. Дозиметры электромагнитных колебаний дециметрового диапазона. — В кн.: Электроника больших мощностей. Вып. 2. М., Изд-во АН СССР, 1963, с. 157—166. Авт.: А. Н. Ветчинкин, Д. Б. Дмитроптов, К. А. Жданов, А. Г. Неделяев.
23. Влияние СВЧ излучений на организм человека и животных. Под ред. И. Р. Петрова. Л., «Медицина», 1970.
24. Внеземные цивилизации. Ереван. Изд-во АН Арм. ССР, 1965.
25. Волков В. М., Сидоренко В. В. Логарифмический видеоусилитель на транзисторах с параллельной нелинейной обратной связью. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение под ред. Я. А. Федотова. Вып. 14. М., «Сов. радио», 1965.
26. Волкова А. П., Кокарев Н. П. Состояние естественного иммунитета у рабочих безоконных и бесфонарных промышленных зданий. — «Гигиена труда», 1970, № 1, с. 18—22.
27. Воронков Г. Я., Минин Б. А., Неделяев А. Г. Электромагнитный дозиметр. Авт. свидетельство № 268521. — «БИ», 1970, № 14.
28. Вострохнутов Н. Г. Электрические измерения. М., «Высшая школа», 1966.
29. Вотчал Б. Е. Лекарство: польза и вред.— «Наука и жизнь», 1970, № 8, с. 70—75.
30. Герасимов Г. Свобода быть гармоничной личностью. — «Литературная газета», 1970, № 40.
31. Гибелер. Генерирование СВЧ колебаний большой мощности.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1970, № 5, с. 109—114.
32. Голосовский С. И. Эффективность научных исследований. М., «Экономика», 1969.
32а. Горбачев А. И., Кукарин С. В. Полупроводниковые СВЧ диоды. М., «Сов. радио», 1968.
33. Горбовский А. Стучавшие в двери бессмертия. — В кн.: Альманах научной фантастики. Вып. 9. М., «Знание», 1970.
34. Гордон З. В. Итоги комплексного изучения биологического действия электромагнитных волн радиочастот и перспективы дальнейших исследований. — В кн.: О биологическом действии электромагнитных полей радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний. АМН СССР, 1964, с. 3.
35. Гордон З. В., Елисеев В. В. Средства защиты от СВЧ облучения и их эффективность. — В кн.: О биологическом действии электромагнитных полей радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний, АМН СССР, 1964.
36. Горн Л. С., Хазанов Б. И. Транзисторы в радиометрической аппаратуре. М., Госатомиздат, 1961.
37. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов сумм, рядов и произведений. М., Физматгиз, 1963.

38. Грей Л., Грэхем Р. Радиопередатчики. Пер. с англ. М., «Связь», 1965, с. 452.
39. Гроднев И. И., Сергейчук К. Я. Экранирование аппаратуры и кабелей связи. М., Связьиздат, 1960.
40. Техника безопасности и гигиена труда при работе с высокочастотными и сверхвысокочастотными установками. М., «Знание», 1969. Авт.: Ф. А. Громов, О. Н. Карелин, А. Ф. Кошелев, Б. З. Персиц.
41. Грудинская Г. П. Распространение радиоволн. М., «Высшая школа», 1967.
42. Гудзенко Л. И., Финкельберг В. М. Импульсный разряд в химически активной среде как источник оптического излучения. М., Физ. ин-т им. П. Н. Лебедева АН СССР, 1967.
43. Давыденко Ю. И. Дальняя тропосферная связь. Воениздат, 1966.
44. Деркач В. П., Корсунский В. П. Электролюминесцентные устройства. Киев, «Наукова думка», 1968.
45. Диодные источники света типа 5082—4400. — «Электроника», 1969, № 13, с. 71.
46. Докучаев В. М. Полезащитное лесоразведение в засушливых степях. М., Сельхозгиз, 1956.
47. Долуханов М. П. О влиянии конечных размеров апертуры антенны в вертикальной плоскости на условия распространения УКВ в пределах прямой видимости. — «Радиотехника», 1967, т. 22, № 2, с. 96.
48. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л. Антенно-фидерные устройства. М., «Сов. радио», 1961.
49. Елпатьевская О. Д. Электрические свойства тонких полупроводящих пленок системы твердых растворов Hg Se + Hg Te и некоторые возможности их практического применения. Канд. дис. Ин-т полупроводников АН СССР, Л., 1958.
50. Ермолаев Е. А., Ковач Р. И. К вопросу о способах оценки облучаемости СВЧ радиоволнами. — «Воен.-мед. журнал», 1968, № 1, с. 55—59.
51. Загодский Я. Т., Левченко Д. Г., Носов В. М. Применение транзисторов в низкочастотной измерительной технике. — В кн.: Полупроводниковые элементы в приборостроении. Под ред. Н. И. Чистякова. М., Отд-ние НТИ по приборостроению, средствам автоматики и систем управления, 1966.
52. Залманов А. С. Тайная мудрость человеческого организма (глубинная медицина). М., «Наука», 1965.
53. Защита плавсостава судов гражданского морского флота от облучения электромагнитными волнами радиочастот. Информационное письмо для санитарно-промышленных врачей и инженеров по технике безопасности. Л., ГНИИ гигиены труда и профзаболеваний, 1965.
54. Зелкин Е. Г. Построение излучающей системы по заданной диаграмме направленности. М., «Энергия», 1963.
55. Из предыстории радио. М., Изд-во АН СССР, 1948, с. 432.
56. Методы построения схем входных устройств амплитудных анализаторов повышенной точности. Объединенный ин-т ядерных исследований, 1967. Авт.: Э. Г. Имаев, К. Е. Ен Сун, В. И. Приходько, Л. М. Сухов, В. Г. Тишин.

57. Нокото Кэнъити и др. Диоки цусин гаккай дзасси. — «J. Inst. Electr. Commun. Engineers Japan», 1966, v. 49, № 1, p. 87—93.
58. Использование радиоспектра. Пер. с англ. Под ред. М. С. Гуревича. М., «Связь», 1969.
59. Кайрюкштис Л. Научные основы формирования высокопродуктивных елово-лиственных насаждений. М., «Лесная промышленность», 1969.
60. Калиниченко Н. П., Писаренко А. И., Смирнов Н. А. Лесовосстановление и лесовыращивание. М., «Лесная промышленность», 1967.
61. Калида Т. В., Никитина В. К. К вопросу об облучении экипажа судов промыслового флота микроволнами. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968, с. 65.
62. Карандеев К. Б., Мизях Л. Я., Гик Л. Д. О частотной полосе усилителей постоянного тока с преобразователем. — «ДАН СССР», 1960, т. 132, № 2.
63. Касименко А. В. Электролюминесцентные буквенно-цифровые индикаторы. М., «Сов. радио», 1971.
64. Кастеллано. Цветные системы отображения на жидких кристаллах. — «Электроника», 1970, № 14, с. 3—11.
65. Кейго Инэука. Новый метод измерения напряженности электрического поля. — «Электроника», 1968, № 8.
66. Кинбер Б. Е. О боковом излучении зеркальных антенн. — «Радиотехника и электроника», 1961, т. VI, вып. 4, с. 545—558.
67. Китаева Л. Н. Методы обзора пространства наземными радиолокационными станциями. М., ЦНИИПИ, 1966.
68. Кнорре К. Г. Параметры полей СВЧ, определяющие гигиеническую оценку условий труда и задачи их измерения. — В кн.: О биологическом воздействии сверхвысоких частот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1960, с. 11.
69. Коноваленко К. И. Особенности газового разряда при СВЧ облучении. Канд. дис. Харьков. гос. ун-т, 1949.
70. Колейкин В. И. К расчету коэффициента направленного действия прямоугольного раскрыва в зоне Френеля. — «Радиотехника и электроника», 1967, т. XII, вып. 1, с. 132—136.
71. Кораблев Л. Н. Лампы с холодным катодом. М., Изд-во АН СССР, 1961.
72. Котосонов И. В. и др. Датчик Холла как индикатор мощности СВЧ. — «Измерительная техника», 1962, № 7.
73. Кравчук Ю. П. Выращивание продуктивных лесных насаждений в Молдавии. Кишинев, «Картя Молдовеняскэ», 1969.
74. Крылов В. А., Соловей А. П. Безопасность труда при работе на установках с генераторами энергии высоких и сверхвысоких частот. М., Оборонгиз, 1961.
75. Крылов В. А., Юченкова Т. В. Защита от электромагнитных излучений. М., «Сов. радио», 1972.
75а. Куипфер И. Экспериментальные и измерительно-технические предпосылки для исследования влияния на организм электромагнитных полей в Германском Центральном Институте трудовой медицины. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т труда и профзаболеваний АМН СССР, 1972, с. 7.

76. Лаповдес Л. М. Химотроника. М., Воениздат, 1968.
77. Левин М. М., Минин Б. А. Способ поверки измерителей плотности потока мощности. Авт. свидетельство № 232375. — «БИ», 1969, № 1.
78. Леоненко И. М. Наземные радиолокационные станции импульсного типа. М., ЦНИИПИ, 1964.
79. Леонов А. И. Радиолокация в противоракетной обороне. М., Воениздат, 1967.
80. Портативный измеритель плотности потока мощности сантиметровых волн. — «В кн.: Труды научной сессии, посвященной итогам работы за 1957 г. Л., ГНИИ гигиены труда и профзаболеваний, 1960. Авт.: Г. Л. Липецкий, Б. Г. Богод, Я. Н. Гузевич, Е. Л. Кулаковская, Е. И. Маккиия.
81. Листова Н. М. О роли щитовидной железы в изменениях газообмена при воздействии СВЧ-поля. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968, с. 89.
82. Маграчев З. В. Вольтметры одиночных импульсов. М., «Энергия», 1967.
83. Малышев В. М., Колесник Ф. А. Электромагнитные волны СВЧ и их воздействие на человека. М., «Медицина», 1968.
84. Мамфорд У. У. Некоторые проблемы опасности микроволнового излучения для организма человека. — «ТИИЭИР», 1961, т. 49, № 2, с. 462—482.
85. Мамфорд У. У. Тепловой стресс при воздействии радиочастотного излучения. — «ТИИЭР», 1969, № 2.
86. «Махабхарата», Т. VII, Ч. 2. Книга о побоище палицами. Пер. с санскрита, Примечания Б. Л. Смирнова. Ашхабад, Изд-во АН Туркм. ССР, 1963.
87. О принципах гигиенического нормирования на некоторых объектах военной техники. — «Воен.-мед. журнал», 1971, № 3, с. 59—61. Авт.: В. И. Медведев, И. Д. Кудрин, П. Н. Курпяте.
88. Методика определения эффективности внедрения новой техники, механизации и автоматизации производственных процессов в промышленности. М., Изд-во АН СССР, 1963.
89. Мэл Х., Индикаторы, предупреждающие о чрезмерной напряженности радиочастотного поля. — «Электроника», 1962, № 29.
90. Милаппов А., Борисова І. Справи йогів. Киев, «Здоров'я», 1971.
91. Минин Б. А. Инженерные аспекты радиометрии и радиопрогноза СВЧ полей, потенциально опасных для человека. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. Сб. материалов Третьего Всесоюзного симпозиума. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968, с. 113—116.
92. Минин Б. А., Троянский М. П. Об интегральном (дозном) подходе к оценке облучаемости. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. Сб. материалов Третьего Всесоюзного симпозиума. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968, с. 116—118.
93. Минин Б. А., Троянский М. П., Валитов Р. А. Устройство для измерения биологически опасных уровней сверхвысоко-

частотного поля. Авт. свидетельство № 223160. — «БИ», 1968, № 24.
94. Минин Б. А., Экспонометр. Авт. свидетельство № 260923. — «БИ», 1970, № 4.
95. Минин Б. А., Чумак П. Н., Фалин П. И. Экспозиметр шума. Авт. свидетельство № 290305. — «БИ», 1971, № 2.
96. Минин Б. А., Блументаль В. С. Переменный аттенюатор поглощающего типа. Авт. свидетельство № 290335. — «БИ», 1971, № 2.
97. Минин Б. А. Зонд для измерения напряженности электромагнитного поля. Авт. свидетельство № 293220. — «БИ», 1971, № 5.
98. Минин Б. А. Экранирующая одежда. Авт. свидетельство № 317373. — «БИ», 1971, № 31.
99. Минин Б. А. Переменный аттенюатор поглощающего типа. Авт. свидетельство № 329608. — «БИ», 1972, № 7.
100. Минин Б. А. Акустический излучатель. Авт. свидетельство № 347951. — «БИ», 1972, № 24.
101. Минц, Хеймер. Новый способ контроля опасных доз СВЧ.— «Зарубежная радиоэлектроника», 1966, № 2, с. 129.
102. Модель А. М. Расчет диаграммы направленности антенны в виде параболоида вращения. — «Радиотехника», 1951, т. 6, № 1, с. 62.
103. Молоканов К. П. Биологические методы профилактики профессиональных заболеваний. М., «Медицина», 1971.
104. Муспл И., Марта К. Некоторые критические замечания к современной технике измерения электромагнитных полей для целей гигиенической службы. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1972, с. 86.
105. Мышкин Н. П. К вопросу о химическом действии потока электронов, образующегося в поле наэлектризованного острия. Спб., 1899.
106. Нагорный В. Мысль и движение. М., «Сов. Россия», 1969.
107. Николаев Ю. С., Налов Е. И. Голодание ради здоровья. М., «Сов. Россия», 1973.
108. Огустин. Визуальное наблюдение картины поля. — «Электроника», 1968, № 13.
109. О допустимом излучении СВЧ плат. — «Электроника», 1969, № 21, с. 5—6.
110. Орлова Т. А. Проблема борьбы с шумом на промышленных предприятиях. М., «Медицина», 1965.
111. Павлов В. В. Полупроводниковые усилители малых сигналов. М., «Энергия», 1966.
112. Патент США № 2985879.
113. Патент США № 3002165.
114. Патент ФРГ № 833516 и 905630.
115. Пеквнер Ю. Д. Статистическое исследование параметров гемодинамики и эритрона у работников, обслуживающих СВЧ генераторы. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1972, с. 19—20.
115а. Полховников Ю. Н. Не дышите глубже. — «Спутник», 1970, № 3, с. 125—129.
116. Попов Н. А. Исследование высокочастотного разряда некоторыми оптическими методами. Канд. дис. МГУ, 1953.

117. Пресман А. С. Электромагнитное поле как гигиенический фактор. — «Гигиена и санитария», 1956, № 9.
118. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа. М., «Наука», 1968.
119. Прецизионный переменный коаксиальный аттенюатор. Патент США, № 3184694.
119в. Принципы и критерии оценки биологического действия радиоволн. — В кн.: Тезисы докладов на симпозиуме 24—28 мая 1973. Воен.-мед. акад. им. С. М. Кирова. Л., 1973.
120. Проблемы реактивности в патологии. Сб. трудов, посвященных 65-летию со дня рождения акад. А. Д. Сперанского. Под ред. Д. Ф. Плецитого. Медгиз, 1954.
121. Проблемы лечебного голодания. Ч. I. Под ред. Ю. С. Николаева. М., М-во здравоохранения СССР, 1969.
122. Пронин А. П., Скородумов Г. Е. Оценка уровня шума. — «Городское хозяйство Москвы», 1970, т. 44, № 8, с. 33—35.
123. Пронин А. П. О применении понятия шумовой экспозиции для нормирования непостоянно действующих шумов. — «Гигиена и санитария», 1967, № 3, с. 93—96.
124. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. М., «Энергия», 1968.
125. Рабинович-Вяземский А. А. Кристаллические детекторы диапазона сверхвысоких частот. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. Под ред. Я. А. Федотова. Вып. 10. М., «Сов. радио», 1960.
126. Разгрузочно-диетическая терапия. Лечение дозированным голоданием (инструктивно-методическое письмо). М., Изд-во здравоохранения РСФСР, 1970.
127. Рамзей В. Частотно независимые антенны. Пер. с англ. Под ред. А. Ф. Чаплина. М., «Мир», 1968.
128. Роллан Р. Собр. соч., т. 19—20, М., «Художественная литература», 1936.
129. Рост производства бытовых плит с СВЧ нагревом. — «Электроника», 1969, № 13, с. 94.
130. Рубинштейн Я. М. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства. М., «Морской транспорт», 1960.
131. Рукман Г. Н. и др. Способ измерения мощности СВЧ колебаний. Авт. свидетельство № 122507. — «БИ», 1959, № 18. Авт. изобретения: Г. Н. Рукман, И. А. Кикурите, М. К. Сафонова, Г. М. Хвиланов.
132. Санитарные нормы и правила по ограничению шума на территориях и в помещениях производственных предприятий. М., М-во здравоохранения СССР, 1969.
133. Санитарные правила работы с источниками мягких рентгеновских лучей (№ 756—68). М., Главн. сан.-эпидем. управление М-ва здравоохранения СССР, 1969.
134. Сверхширокополосные антенны. Пер. с англ. Под ред. Л. С. Бенсона. М., «Мир», 1964.
135. СВЧ-энергетика. Под ред. Э. Окресса, Т. 3. М., «Мир», 1971.
136. Связь на сверхвысоких частотах. Пер. с англ. М., «Связь», 1967.
137. Севастьянов В. В. Структура СВЧ поля вблизи излучателей, предназначенных для локального воздействия на биообъект, и дифракционные явления. — В кн.: Гигиена труда и

биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968, с. 140.
138. Семенов А. А. Условия работы и гигиеническое обеспечение персонала радиолокационных станций в полевых условиях. — В кн.: Научные труды Воен.-мед. фак. при Саратовском мед. ин-те. Саратов. «Коммунист», 1958, с. 41—53.
139. Сергованцев Б. В. Воздействие СВЧ на человека (краткий обзор зарубежных работ за период 1950—1961 гг.) — «Новости зарубежной военной радиоэлектроники», 1961, т. XI, № 20—21.
140. Сестрорецкий Б. В., Либерман Л. С. Теория СВЧ переключателей на полупроводниковых диодах. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. Под ред. Я. А. Федотова. Вып. 12. М., «Сов. радио», 1964.
141. Сканирующие антенные системы СВЧ. Пер. с англ. Ч. 1. М., «Сов. радио», 1966.
142. Слеттон. Современные антенны в технике космической связи. — «Электроника», 1962, № 35.
143. Слуцкая В. В. Тонкие пленки в технике СВЧ. М., «Сов. радио», 1963.
144. Справочник по основам радиолокационной техники. Под ред. В. В. Дружинина. М., Воениздат, 1967.
145. Стейнберг Ж., Лекю Ж. Радиоастрономия. Пер. с англ. М., ИЛ, 1963.
146. Стреттон Дж. Теория электромагнетизма. М., Гостехиздат, 1948.
147. Суббота А. Г. Нетепловое действие микрорадиоволн на организм. — «Военно-медицинский журнал», 1970, № 9, с. 39—45.
147а. Суббота А. Г., Светлова З. П. О дезадаптирующем и декомпенсирующем действии микрорадиоволн. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1972, с. 12—14.
148. Тарапов А. Г. Устройство для модулирования физических процессов в проводящей среде. Авт. свидетельство № 151838.— «БИ», 1962, № 22.
149. Тартаковский Б. Д. Борьба с шумом. — «Городское хозяйство Москвы», 1970, т. 44, № 8, с. 31—33.
150. Тартаковский Л. П. Боковое излучение идеального параболоида с круглым раскрывом. — «Радиотехника и электроника», 1959, т. IV, № 6.
151. Тейлор Ф., Флойд С., Роулинсон В. Некоторые вопросы измерения интенсивности электромагнитных полей, представляющих потенциальную опасность. — В кн.: Электроника в медицине. Сб. материалов III Международной конференции по медицинской радиоэлектронике (Лондон, 1960). Рига, ЦБТИ Латв. ССР, 1962.
152. Тишер Ф. Техника измерений на СВЧ. М., Физматгиз, 1963.
152а. Труды ин-та гигиены труда и профзаболеваний. Вып. 1. М., 1960, с. 52.
153. Тягин Н. В. Клинические аспекты облучений СВЧ диапазона. М., «Медицина», 1971.
154. Уход за лесом и лесные полосы. Сб. переводов под ред. Г. Р. Эйнштена. М., ИЛ, 1957

155. Уэстгейп. Проблемы внедрения СВЧ плит. — «Электроника», 1969, № 21, с. 27—31.
155а. Физические факторы внешней среды. [Сборник]. М., АМН СССР, 1960, с. 184.
156. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот. М., «Сов. радио», 1957.
157. Фудзисава. Об измерениях напряженности поля сантиметровых волн с помощью эффекта Керра в кристаллах первичного кислого фосфата аммония. Пер. с японск. — «Дэнки гакхай дзассн», 1956, т. 76, № 9, с. 1079—83.
158. Холявко Ф. Р. О нормировании и оценке СВЧ облучения по величине полученной дозы. Тезисы докладов XVI Укр. респ. науч.-техн. конференции, посвященной Дню радио. Киев, «Наукова думка», 1966, с. 150.
159. Чяжевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. Госпланиздат, 1960.
160. Чудинов В. И. Шум — враг здоровья. М., «Знание», 1969.
161. Шейко В. П. Измерения мощности на СВЧ с помощью вариконда. — В кн.: Ученые записки, т. 121. Труды радиофизического факультета Харьк. гос. ун-та им. А. М. Горького. Харьков, 1962, т. 5.
162. Шнейдерман Я. А. Радиопоглощающие материалы. Обзор зарубежных работ за период 1953—1964 г.г. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1965, № 4.
163. Шнейдерман Я. А. Новые радиопоглощающие материалы. — «Зарубежная радиоэлектроника», 1969, № 6, с. 101—124.
164. Штемплер В. М. Влияние излучения электромагнитных полей радиочастот на активность ферментов каталаза и холинэстеразы. — В кн.: Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., Ин-т гигиены труда и профзаболеваний АМН СССР, 1968.
165. Эйзенрейх Х. Быстрорастущие древесные породы. Пер. с нем. Под ред. А. В. Альбенского. М., ИЛ, 1959.
166. Adequate warning. — «Electronic Industries», 1958, v. 17, № 10, p. 8.
167. Alm H., Kutting H. Experimentalle und klinische Untersuchungen mit hochfrequenten im oberen Dezimeterwellenbereich. — Strhalen-therapie», 1961, № 116, S. 297—310.
168. Austin G., Horwath S. Production of convulsions in rats by exposure to ultra-high frequency electrical currents (radar). — «Amer. J. Med. Sci.», 1949, v. 218, p. 115.
169. Austin G., Horwath S. Production of convulsions in rats by high-frequency electrical currents. — «Amer. J. Phys. Med.», 1954, v. 33, p. 141.
170. Barnes E. C. The spectrums in industriel hygiene. — «Amer. Industriel Hyg. Ass. J.», 1971, v. 31, № 3, p. 265—275 (см. Хим. рефер. ж., 1971, № 1, с. 11).
171. Cheo B. R. A solution to the frequency independent antenna problem. — «Trans. IRE», 1961, v. AP-9, № 6, p. 527—534.
172. Comming W. A. Radiation measurements at radio frequencies: a servey of current techniques. — «Proc. IRE», 1959, № 5, p. 705—735.
173. Constant P. C., Martin E. J. The radiation hazards (Rad. Haz.) program on the formulation of standards. — «Trans. IEEE», 1963, v. RFI-5, № 1.

174. Collingham J. M. A radar radiation monitor. — «British Communications and Electronics», 1960, v. 7, № 6, p. 419.
175. Deily L. E. Clinical Study of the results of exposure of laboratory personnel to radar and high frequency radio. — «US Naval Medical Bulletin», 1943, v. 41, p. 1052—1065.
176. Detecting microwaves radiation hazards. — «Electronics World», 1961, v. 65, № 6, p. 31—33.
177. Du Hamel R. H., Berry D. G. Logarithmically periodic antenna arrays. — «IRE Wescon Conv. Record», 1958, v. VIII, Pt. I, p. 161.
178. Du Hamel R. H. Патент США № 2985879.
179. Gernsback H. Radar Hazards. — «Radio-Electronics», 1953, v. 24, № 8, p. 25.
180. Gillard C. W., Frances R. E. Frequency independent antennas (several new and undeveloped ideas). — «Microwave J.», 1961, v. 4, № 2, p. 67—72.
181. Hansen R. C., Bailin L. L. A new methods of near field analysis. — «Trans. IRE», 1959, v. AP-7, XII, Suppl.
182. Hirsch F. G. The use of biological simulants in estimating the dose of microwave energy. — «Trans. IRE», 1956, v. PGME-4, p. 22.
183. Hu M. K. Fresnel region field distributions of circular aperture antennas. — «IRE Trans.», 1960, v. AP-8, № 3, p. 344—346.
184. Jaski T. Radio waves and life. — «Radio Electronics», 1960, v. 31, № 9, p. 43—45.
185. Kahn H., Wiener A. The Jear 2000. New York, 1967.
186. Kay A. F. Near-field gain of aperture antennas. — «Trans. IRE», 1960, v. AP-8, № 6, p. 586—593.
187. Kraus J. D. Antennas, Ch. 4, New York, 1959.
188. Krusen F. H. Address of welcome. — «Trans. IRE», 1956, v. PGME-4, p. 3.
189. LaGrone A. N., Chapman C. W. Some propagation characteristics of high UHF signals in the immediate vicinity of treas. — «Trans. IRE», 1961, v. AP-9, № 5.
190. Leary F. Researching microwave health hazards. — «Electronics», 1959, v. 32, № 8, p. 49—53.
191. Luciano M. Alcuni aspiti della zu flession di segnali a radio frequenza da parte delterreno. — «Alta Frequenza», 1967, v. 36, № 1, p. 58—67.
191a. Mumford W. W. Heat stress due to r. f. radiation. — «Non-Ionizing Radiation», 1969, v. 1, № 3, p. 113.
192. Pazderova J. Vliv electromagnetickehozareni radu em a m na zdravi Cloveca. — «Pracovni Lekarstvi», 1968, v. 20, № 10.
193. Power meter protects microwave workers. — «Electronics», 1958, v. 31, № 43, p. 100—102.
194. Roberts J. E., Cook H. F. Microwaves in medical and biological research. — «Brit. J. of Appl. Phys.», 1952, v. 3, № 2, p. 33—40.
194a. Scott J. Is to day's standard for microwave radiation safe for humans? — «Microwave J.», 1971, № 1, p. 9—12.
195. Sivananda Sw. Science of pranayam. Rishikesh, 1949.
196. Sucher M., Box J. Handbook of microwave measurements. Ch. 3. New York, 1963.
197. Universal vade (электронные лампы и полупроводниковые приборы). Справочник. Варшава, 1960.

198. Weeks W. L. Antennas Engineering. New York. St. Louis, San Francisko, Toronto, London, Sydney, 1968.
199. Wheeler H. A The radiansphere around a small antenna. — «Proc. IREs», 1959, v. 47, № 8.
200. Wünsche C. Die Messung der Spitzen leistung kurzer Microwellenimpulse mit Hilfe des pyroelektrischen Effekts. — «Z. angew. Phys.», 1967, v. 22, № 5, p. 399—402.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Амплитудно - поляризационная изотропность 260, 268, 269
Антенно-дифракционный критерий 308
Антенные решетки 33, 153, 171

Биологический эквивалент 58, 78
Боковое поле в ближней зоне 103, 138
— — в дальней зоне 99, 130

Варианты облучения 80—88
Вертикальная диаграмма излучения (ВДИ) 94, 152, 158—167
Внутренние поля 24, 89, 218, 257

Дезадаптирующее действие 46, 50, 318
Дифракционный экран 278—287
Доза, дозиметрия 69, 78, 185, 187, 199, 237, 260, 264, 273

Защитные свойства строительных материалов 280
Зоны излучателей 26, 63, 102, 129

Измеритель поля, интенсиметр 199, 202, 205, 214, 218, 234, 237

Комплексная категория тяжести условий труда 322
Критические показатели организма 61

Метод расчета поля апертурный 154
— — — краевых волн 98
— — — ретроспективный, Р-метод 93, 124—157
Методы защиты, классификация 275

Нормирование в разных странах 12, 13
—, выбор параметров 62
—, критерии 58
— многоуровневое 58
—, недостатки 27, 61, 62, 68
— обычными способами 68
—, ограничения 75
— по дозе 69
—, учет времени 79, 185, 197
—, учет реактивного поля 65, 258
—, этапы 88
—, этапы развития идей 72—73

Облучение, измерение—см. Измеритель поля
— на борту корабля 256
— — — летательных аппаратов 23, 168, 256
—, ракурс 42, 47, 93
—, условия 24—30
Оценка условий труда 324

Предельно допустимые уровни воздействия 12, 14

Радиофон 19, 31
Распространение волны вблизи радиоотражающих поверхностей 180, 256
— — за дифракционным экраном 179, 287
— — на закрытой трассе 177
— — над плоской полупроводящей поверхностью 175
— —, экспериментальная оценка влияния 180

Система последовательного контроля облучаемости, СПКР 91, 185, 198, 273, 335
Стимулирующее действие радиоволн 46, 56
Сфокусированные апертуры 35, 118—123

ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения 6
Вводные замечания 9

1. Электромагнитная биосфера Земли. Природа и экология 16
   1.1. Электромагнитное поле как биофизический фактор. Электромагнитная биосфера земли 17
   1.2. Радиоизлучения в процессе производства и эксплуатации СВЧ аппаратуры 21

2. Биофизика СВЧ воздействий. Методика изучения вредных последствий 39
   2.1. Биофизика воздействия электромагнитного поля СВЧ на организм 40
   2.2. Краткий обзор методов исследования биологического действия СВЧ полей 50

3. Нормирование электромагнитных полей 58
   3.1. О выборе регистрируемых параметров электромагнитного поля 62
   3.2. Формы нормирования радиоизлучений 68

4. Методы прогноза облучаемости 89
   4.1. Краткая оценка методов радиопрогноза 90
   4.2. Основы «традиционных» методов расчета поля . . 94
   4.3. Ретроспективный метод расчета поля антенн . . . 124

5. Основы и практика радиопрогноза 157
   5.1. Прогноз интенсивности поля в свободном пространстве 158
   5.2. Учет влияния условий распространения и распределения электромагнитного поля 172
   5.3. Учет времени воздействия радиополей РТС с перемещающимися диаграммами излучения 185

6. Техника радиоизмерений. Аппаратура и методы . . . 199
   6.1. Методы и аппаратура интенсиметрии СВЧ полей биологически опасных уровней 202
   6.2. Практика интенсиметрии полей 249
   6.3. Автоматический контроль радиобезопасности. Дозиметрия СВЧ 259

7. Техника защиты от электромагнитных СВЧ полей. Сопутствующие факторы 274
   7.1. Общие принципы инженерно-технической защиты . . 276
   7.2. Коллективная защита 278
   7.3. Локальная и индивидуальная защита 292
   7.4. Некоторые вопросы организации защиты от воздействия СВЧ излучений. Сопутствующие факторы . 311

Заключение 334
Список литературы 339
Предметный указатель 350

Минин Б. А.

М618 СВЧ и безопасность человека. М., «Сов. радио», 1974.

352 с. с ил.

Изложены основные принципы обеспечения безопасности людей, работающих под воздействием мощных электромагнитных излучений в диапазоне СВЧ. Приведены сведения, позволяющие рассчитывать и измерять поля антенн и внутренних излучений, возможных при работе средств связи, радиовещания, радиолокации, радионавигации. Приведены некоторые характерные результаты исследований в области биологического действия радиоволн СВЧ. Кратко рассмотрены вопросы теории и практики нормирования радиоизлучений. Даны основные сведения по организации защиты от СВЧ и рентгеновских излучений.

Книга рассчитана на инженеров, техников, радиолюбителей, а также научных работников общего профиля, занимающихся обеспечением безопасности и проектированием средств защиты.

М $\frac{30404\text{-}012}{046(01)\text{-}74}$ 32-73 6Ф2.19

Борис Алексеевич Минин

СВЧ и безопасность человека

Редактор *К. М. Волкова*
Художественный редактор *З. Е. Шендрова*
Обложка художника *В. В. Волкова*
Технический редактор *О. Д. Кузнецова, Л. А. Белоус*
Корректор *Н. М. Давыдова*

Сдано в набор 14/IX 1973 г. Подписано в печать 28/II 1974 г. Т 00381
Формат 84×108/32 Бумага машинописная
Объем 18,48 усл. п. л., 20,235 уч.-изд. л.
Тираж 10 000 экз. Зак. 333 Цена 1 р. 31 к.

Издательство „Советское радио". Москва, Главпочтамт, а/я 693

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.